

МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА, ПОИСКОВ, ОЦЕНКИ
И РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.81+549

К вопросу транспортабельности кимберлитовых минералов относительно коренного источника на примере пиропы и пикроильменита

Хмельков А. М., Чугуевская Э. А.

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

Аннотация. Приведены данные о транспортабельности кимберлитовых минералов по мере удаления их от коренного источника. Утверждается, что степень механической обработки зёрен минералов-индикаторов кимберлитов является наиболее надёжным критерием определения дальности их транспортировки. Ставится под сомнение использование только гранулометрии зёрен для определения дальности их переноса по причине тесной взаимосвязи процентных отношений классов крупности кимберлитовых минералов с гидродинамическими условиями. Изложены конкретные рекомендации по количественному определению дальности переноса минералов-индикаторов кимберлитов относительно первоисточника. Предложена комплексная графическая модель зависимости степени сохранности кимберлитовых минералов от дальности их транспортировки. Показано, что поскольку износ кимберлитовых минералов является функцией расстояния, нахождение в одном и том же ореоле в сколько-либо заметных количествах «свежих» зёрен и совершенно изношенных минералов нельзя связывать с одним и тем же источником.

Использование комплексной диаграммы распределения гранатов и пикроильменитов разной степени сохранности в зависимости от дальности их транспортировки будет способствовать повышению эффективности алмазопромышленных работ.

Ключевые слова: кимберлиты, минералы-индикаторы кимберлитов, пироп, пикроильменит, первичная поверхность, механический износ, класс сохранности.

Для цитирования: Хмельков А. М., Чугуевская Э. А. К вопросу транспортабельности кимберлитовых минералов относительно коренного источника на примере пиропы и пикроильменита. Руды и металлы. 2026. № 2. С. 26–39. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10007.

On the problem of transportability of kimberlite minerals relative to their source: The case of pyrope and picroilmenite

Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A.

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

Annotation. Data on transportability of kimberlite minerals with increasing distance from their primary source are presented. It is argued that the degree of mechanical processing of kimberlite indicator mineral grains is the most reliable criterion for determining their transport distance. In contrast, determining the transport distances with the use of grain size distribution alone is called into question because of a close relationship of the percent ratios between the kimberlite mineral size classes to the hydrodynamic conditions. Specific recommendations are presented for quantifying the transport distance of kimberlite indicator minerals relative to the primary source. A comprehensive graphical model is proposed for the dependence of the kimberlite minerals preservation degree on their transport distance. It is demonstrated that since kimberlite minerals wear is a function of the transport distance, the presence of rather significant quantities of their "fresh" grains and of completely worn minerals in the same aureole cannot be attributed to the same source.

The use of the comprehensive diagram of the distribution of garnets and picroilmenites of varying preservation degrees depending on their transport distance will contribute to increasing the diamond prospecting efficiency.

Keywords: kimberlites, kimberlite indicator minerals, pyrope, picroilmenite, primary surface, mechanical wear, preservation class.

For citation: Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A. On the problem of transportability of kimberlite minerals relative to their source: The case of pyrope and picroilmenite. Rudy i metally (Ores and metals). 2026. No. 2. pp. 26–39. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10007.



Введение

Дальность транспортировки минералов-индикаторов кимберлитов (МИК) от коренного источника, а также трансформация их в процессе переноса интересовали исследователей с самого начала алмазопроисловых работ на территории Якутской алмазонасной провинции (ЯАП). Так, ещё Л. А. Попугаевой при открытии первой на Сибирской платформе кимберлитовой трубки Зарница был сделан вывод, что по мере удаления от коренного источника концентрация МИК и размеры их зёрен убывают. К наиболее важным исследованиям в данном направлении следует отнести работы Б. И. Прокопчука [5], Н. Н. Сарсадских и М. И. Плотниковой [6], Е. Д. Чёрного, Л. А. Зимина, В. П. Афанасьева [1–3], А. Д. Харькина [8–10]. Однако особенно важными и результативными в поисковом отношении являются практические, теоретические и экспериментальные исследования Л. А. Зимина, значение которых до сегодняшнего дня трудно переоценить. При этом значительный объём сведений по сохранности МИК в процессе их транспортировки изложен в производственных отчётах Амакинской ГРЭ АК «АЛРОСА» и не известен широкому кругу исследователей. В ранее опубликованных материалах приведён общий обзор отчётных данных по изучению трансформации МИК в процессе переноса [12], поэтому ниже остановимся лишь на основных моментах данных исследований.

Постановка проблемы

Несмотря на огромный практический опыт поисков кимберлитовых тел шлихо-минералогическим методом, вопрос определения степени удалённости от коренного источника кимберлитовых минералов по их внешним признакам до сих пор остаётся актуальным [11]. Более того, определение удалённости кимберлитовых тел по облику МИК является одной из важнейших задач шлихо-минералогического метода поисков алмазных месторождений.

К сожалению, в стремлении к совершенствованию шлихового метода применительно

к поискам коренных источников алмазов различные исследователи применяют собственные критерии установления степени механического износа МИК. В результате подход к оценке степени износа и сохранности кимберлитовых минералов по мере удаления от кимберлитового тела в процессе транспортировки настолько различен, что порой провести сравнение результатов, полученных разными авторами и организациями, просто невозможно. Нередко разнообразие мнений по поводу механического износа МИК при их переносе связано с различным толкованием самого термина «сохранность МИК», что, безусловно, вносит путаницу. Так, нередко под сохранностью кимберлитовых минералов подразумевается лишь степень их целостности (целые и колотые зёрна), а под степенью механического износа понимается исключительно степень эволюции формы зёрен по литологической шкале окатанности [1]. Однако литологическая шкала окатанности МИК не позволяет количественно определить дальность переноса кимберлитовых минералов от первоисточника – она предоставляет возможность лишь на качественном уровне судить о степени удаления МИК от кимберлитового тела. К тому же в процессе транспортировки в водной среде кимберлитовые минералы многократно окатываются, раскалываются и вновь вовлекаются в процесс механического износа. Кроме этого, кимберлитовые минералы, в том числе изношенные зёрна, могут подвергаться коррозионному растрескиванию в широком диапазоне экзогенных обстановок, и попадание таких колотых зёрен в механические ореолы рассеяния может создавать иллюзию близости коренного источника по причине отсутствия на них видимых следов механического износа по литологической шкале окатанности.

В практике алмазопроисловых работ, в частности в производственных организациях АК «АЛРОСА», под степенью механического износа кимберлитовых минералов принято понимать в первую очередь степень износа (сохранности) первичного микрорельефа на зёрнах, сформировавшегося в процессе становления кимберлитовых тел [13]. Первичные



поверхности на МИК более чувствительны к процессу истирания, что позволяет количественно оценить степень удаления кимберлитовых минералов от первоисточника. Поэтому, решая задачу определения степени удалённости МИК от первоисточника, следует рассматривать изменения минералов в процессе транспортировки не столько с позиций эволюции макроморфологии зёрен, сколько с позиций трансформации микротопографии их первичных поверхностей, которые более чувствительны к механическому воздействию в процессе переноса водными потоками. Вот почему определение сохранности МИК является важным видом минералогических исследований, который используется практически только при алмазопроизводственных работах.

Не вызывает сомнения тот факт, что транспортировка минералов в процессе формирования шлиховых ореолов обуславливает их механическое истирание [7]. Однако в процессе транспортировки МИК вначале истираются первичные поверхности, и только затем эволюционирует форма зёрен [12]. Одновременно происходит перераспределение минералов по плотности и гранулометрии, осуществляется их измельчение и снижается концентрация [10]. На сегодня хорошо известны общие закономерности изменения минерального вещества в процессе транспортировки, среди которых можно назвать основными следующие:

- концентрация минералов каждого гранулометрического класса, как и всей минеральной ассоциации, резко падает по мере удаления от коренного источника;
- наименее подвижны крупные гранулометрические классы, концентрация которых происходит вблизи первоисточника;
- минералы с меньшей плотностью, такие как гранат, оливин и хромдиопсид, более мобильны по сравнению с такими «тяжёлыми» минералами, как пикроильменит или хромшпинелид.

Вполне очевиден и тот факт, что степень механического износа МИК зависит от суммарно пройденного ими расстояния в процессе переноса и поэтому априори связывается с удалённостью от коренного источника [11].

Однако для определения местоположения первоисточника по внешнему облику МИК из ореолов рассеяния необходимо хорошо знать закономерности изменения этих минералов в экзогенных условиях.

Процессы механического износа МИК рассматриваются, как правило, с точки зрения их транспортировки в водно-аллювиальной среде. Отдельные исследователи утверждают, что в континентальных условиях перенос на многие десятки километров не вызывает заметных признаков механического износа на минералах [1, 4]. Не вступая в дискуссию по поводу этих высказываний, отметим, что не все исследователи разделяют такое мнение. Большинство специалистов в данной области всё же считают, что степень износа минералов – один из самых важных критериев при прогнозировании удалённости ореола от источника сноса. В качестве примера можно привести результаты наблюдений И. П. Илупина по прослеживанию степени окатанности пиропы и пикроильменита в пределах Алаakit-Мархинского кимберлитового поля ЯАП [10]. Эти исследования показали, что уже в делювиальных отложениях на расстоянии первых сотен метров от коренного источника на зёрнах пикроильменита возникают следы износа. Они выражаются в появлении плоских площадок на неровной первичной бугорчатой поверхности этого минерала, частичном или полном уничтожении шиповидных выступов. В аллювиальных отложениях на расстоянии первых километров от коренного источника следы износа проявляются в виде округления углов и рёбер обломков зёрен пиропы.

Таким образом, именно степень механической обработки зёрен МИК, по мнению А. Д. Харькина, является наиболее надёжным критерием определения дальности их транспортировки [10]. Результаты изучения этим автором кимберлитовых минералов из аллювиальных отложений показали, что во всех случаях по мере удаления от коренного источника истираются первичные (магматогенные) поверхности и те скульптуры, которые формируются под воздействием магматической среды (микрошероховатость, микробугорчатость, бородавчатость, шиповидные



выступы), уничтожаются трещиноватые зёрна, сглаживаются углы и рёбра первичных сколов на зёрнах пиропы и пикроильменита. Также установлено, что келифитовая оболочка присутствует на пиропе на расстоянии не более сотен метров от первоисточника, поэтому обнаружение в ореолах зёрен этого минерала с реликтами келифитовой каймы является надёжным признаком близости кимберлитового тела.

Вопросами транспортировки кимберлитовых минералов и определения дальности их переноса от коренного источника в конце прошлого столетия детально занимались геологи Амакинской экспедиции под руководством Л. А. Зимины. В процессе данных исследований на ряде объектов ЯАП детально изучены минералы из опытных партий шлихов экспериментальных отрезков водотоков, прослежены закономерности изменения макро- и микроморфологии МИК по мере удаления их от первоисточника. По мнению Л. А. Зимины, тесная взаимосвязь процентных отношений классов крупности минералов кимберлита с гидродинамическими условиями потока, которые очень часто, буквально через несколько метров, меняют свой характер, ставит под сомнение возможность использования только гранулометрии зёрен для определения дальности их переноса. Интересные результаты получены для оливина и хромдиопсида, считавшихся малотранспортабельными минералами кимберлитов. Отмечено, что на расстоянии до 20 км от коренного источника данные минералы не приобретают каких-либо следов механического истирания, что, возможно, связано с их хрупкостью: в процессе транспортировки в пределах указанного расстояния они лишь измельчаются. Наблюдения за изменением поверхности зёрен пиропы и пикроильменита при переносе в водной среде показали, что при удалении на 50–90 км от источника истёртые зёрна пикроильменита из-за микроскопических сколов имеют тёмно-серый цвет, напоминающий цвет графита, и этим резко отличаются от зёрен минерала, не испытывавшего транспортировки. Зёрна пиропы, испытавшие определённый перенос, в отличие от пикроильменита, не

выкрашиваются, а в основном шлифуются, благодаря чему зёрна приобретают гладкую и тусклую поверхность. Лейкокситовые первичные «рубашки», по наблюдениям Л. А. Зимины, в аллювиальных условиях могут сохраняться на достаточно большом расстоянии, превышающем иногда 20 км. Утверждается, что пикроильменит является менее устойчивым минералом по сравнению с пиропом и быстрее изнашивается.

В результате данных исследований возникла необходимость в отыскании удобной и простой в практическом плане шкалы механического износа кимберлитовых минералов, отражающей степень их истирания в процессе переноса. Такая шкала, в основу которой был положен признак степени механического износа первичных поверхностей на кимберлитовых минералах, или степень сохранности, была разработана Л. А. Зиминым совместно с сотрудниками Амакинской ГРЭ в 1973 г. Первоначально предложенная шкала включала восемь классов сохранности МИК, однако впоследствии была сокращена до четырёх классов [11, 12].

Ниже на примере зёрен пиропы (рис. 1) и пикроильменита (рис. 2) показан внешний вид каждого класса сохранности и дана их краткая характеристика. Первичные поверхности на МИК довольно наглядно нами охарактеризованы в ранее опубликованных материалах [13] и в данной работе не рассматриваются. Отметим лишь, что к первичным поверхностям традиционно относятся преимущественно эндогенные (магматогенные) поверхности на минералах, сформировавшиеся в результате реакции зёрен с кимберлитовым расплавом. В определённых случаях в качестве первичных поверхностей может использоваться микрорельеф на МИК, сформировавшийся в гидротермальную стадию становления кимберлитовых тел.

К I классу сохранности относятся целые, колотые и трещиноватые зёрна без малейших следов механического износа (истирания, скрашивания) первичных поверхностей (рис. 1, а; рис. 2, а).

Зёрна II класса сохранности уже имеют следы механического износа. Вершины бугорков

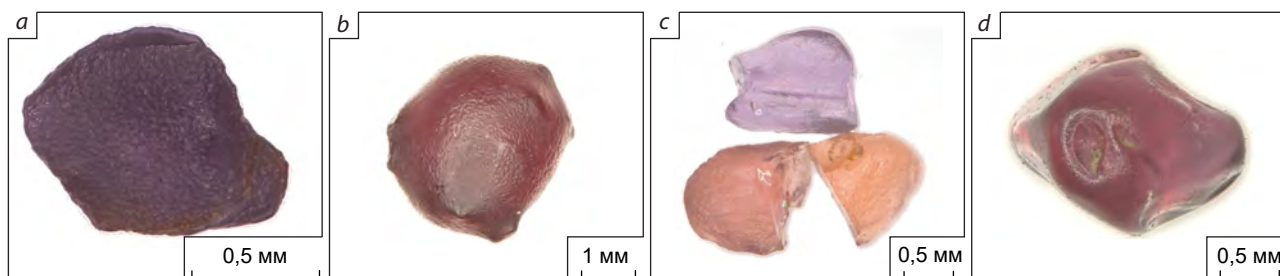


Рис. 1. Сохранность кимберлитовых минералов на примере зёрен пирропа с шероховатой первичной поверхностью:

a – I класс (тр. Нюрбинская, Накынское кимберлитовое поле); *b* – II класс, шероховатая в комбинации с бородавчатой поверхностью (бассейн р. Муна, Муно-Тюнгский алмазоносный район); *c* – III класс (бассейн р. Элиетибие, Нижнеленский алмазоносный район); *d* – IV класс (р. Муна); пояснения в тексте

Fig. 1. Preservation degree of kimberlite minerals on an example of pyrope grains with a rough original surface:

a – Class I (Nyurbinskaya pipe, Nakyn kimberlite field); *b* – Class II, rough surface combined with a warty surface (Muna River basin, Muna-Tyung diamondiferous district); *c* – Class III (Elietibie River basin, Lower Lena diamondiferous district); *d* – Class IV (Muna River); explanations in the text

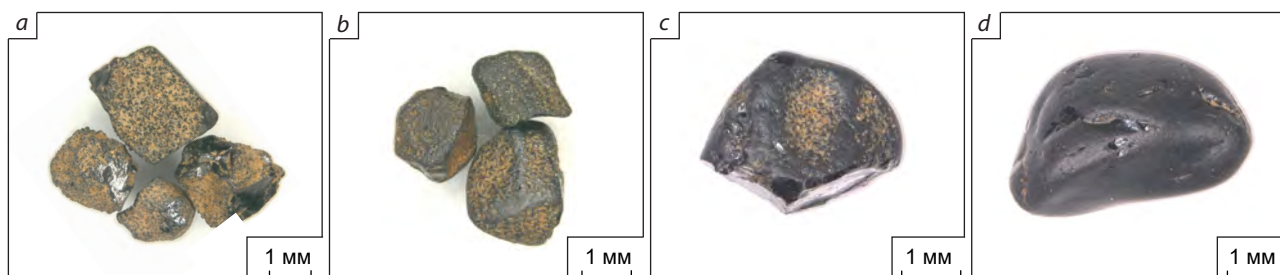


Рис. 2. Сохранность кимберлитовых минералов на примере зёрен пикроильменита с мелкобугорчатой первичной поверхностью (бассейн р. Серки, Приленский алмазоносный район):

a – I класс; *b* – II класс (р. Керчимэ); *c* – III класс; *d* – IV класс (р. Самальджикан)

Fig. 2. Preservation degree of kimberlite minerals on an example of picroilmenite grains with a finely tuberculate original surface (Serki River basin, Lena diamondiferous region):

Preservation classes: *a* – Class I; *b* – Class II (Kerchime River); *c* – Class III; *d* – Class IV (Samaljikan River)

первичной поверхности и острые рёбра колотых зёрен притёрты. Площади первичных поверхностей значительно больше площадей вторичного происхождения, образованных в результате механического истирания зёрен при переносе (рис. 1, *b*; рис. 2, *b*).

К III классу сохранности относятся зёрна МИК, на которых первичные поверхности сохранились в виде реликтов. Большая часть площади поверхности зёрен имеет вторичное

происхождение, образовалась в результате механического износа (рис. 1, *c*; рис. 2, *c*).

На зёрнах IV класса сохранности полностью отсутствуют следы первичных поверхностей (рис. 1, *d*; рис. 2, *d*).

Следует отметить, что деление на классы сохранности носит несколько условный характер, особенно это относится к разделению зёрен на II и III классы. Чтобы минимизировать субъективность в этом вопросе, изначально



принято, что границей между II и III классами сохранности является равное соотношение первичных поверхностей и поверхностей, приобретённых зерном минерала в процессе механического износа. Другими словами, если первичная поверхность на зерне стёрта менее чем на 50 %, то данный конкретный минерал относится к II классу сохранности; при условии износа первичной поверхности более чем на 50 % зерно минерала относится к III классу сохранности [12].

Примечательно то, что шкала сохранности кимберлитовых минералов, разработанная Л. А. Зиминым с соавторами, до сих пор успешно используется при алмазопроизводственных работах не только производителями АК «АЛРОСА», но и другими исследователями. С помощью данной шкалы сохранности за всё время её использования геологами Амакинской ГРЭ открыты сотни кимберлитовых тел, причём не только в пределах ЯАП.

В какой-то момент к четырём классам сохранности в качестве дополнения стал выделяться «нулевой» класс сохранности, к которому относили МИК в примазках кимберлита, что не совсем правомерно и чревато ошибками при определении степени удаления от коренного источника. Дело в том, что выделение такого класса только по наличию примазок на МИК противоречит самому принципу шкалы сохранности, в основу которой изначально заложена степень механического износа первичных поверхностей МИК. При этом в реальных условиях нередко встречаются случаи, когда примазки кимберлита сохраняются даже на зёрнах МИК II класса сохранности. Более того, иногда примазки непонятного состава и генезиса могут присутствовать на зёрнах минералов без всяких признаков наличия у них первичных поверхностей, и эти примазки ошибочно могут быть отнесены к кимберлитовым. Безусловно, кимберлитовые примазки на минералах как показатель степени удаления минерала от коренного источника имеют важное поисковое значение, и их необходимо учитывать. Однако без «тонких» исследований зачастую трудно определить состав и генезис этих примазок. Поэтому не сле-

дует связывать наличие примазок на зёрнах МИК с их сохранностью и не стоит путать эти совершенно разные морфогенетические особенности кимберлитовых минералов.

В результате проведённых исследований Л. А. Зиминым были сделаны важные в поисковом отношении выводы. В частности, было отмечено, что на расстоянии до 15 км от коренного источника среди пиропов встречаются преимущественно зёрна I класса сохранности. При этом по мере удаления от коренного источника одновременно происходит разрушение трещиноватых зёрен с образованием остроугольных обломков. Как следствие, количество целых массивных и трещиноватых зёрен по мере удаления от кимберлитового тела постепенно уменьшается, а количество обломков, наоборот, возрастает. На расстоянии 15 км и более от источника возможно обнаружение первых процентов зёрен пироба II класса сохранности. Первичные поверхности на данном минерале начинают приобретать следы механического воздействия в виде незначительной притёртости микрорельефа. Далее, по мере удаления от коренного источника до 40 км, происходит постепенное снижение процента зёрен I класса среди пиропов при одновременном постепенном увеличении числа зёрен II класса сохранности. Таким образом, расстояние переноса пиропов хорошей сохранности (I–II классов) довольно значительное и может достигать в определённых условиях 40 км и более. Однако следует отметить, что все приведённые выше выводы применительны к «стерильным» районам, где отсутствует влияние посторонних источников в виде промежуточных коллекторов МИК, что в реальных поисковых обстановках встречается крайне редко. В районах с посторонними источниками пиропы с механическим износом фиксируются уже на расстоянии 10 км от источника, при этом зёрна пикроильменита II класса сохранности начинают встречаться уже на расстоянии 3 км, а III и IV классов – фиксируются на удалении 5–7 км и 13–15 км соответственно. Также в процессе исследований сотрудниками Амакинской ГРЭ было отмечено, что по мере удаления от коренного



источника соотношение пироп/пикроильменит увеличивается по причине различной механической устойчивости этих минералов.

Таким образом, даже при стопроцентном содержании в шлихах зёрен пироба I класса сохранности расстояние до кимберлитового тела может достигать 10–15 км. Тем не менее в любом случае содержание МИК I класса сохранности, равное 100 %, будет свидетельствовать о непосредственной близости коренного источника. При этом следует заметить, что в отдельных случаях минералы с признаками износа могут присутствовать непосредственно над кимберлитовым телом, что находит подтверждение на целом ряде объектов в пределах ЯАП [12]. Это относится к районам, где имеют или имели распространение промежуточные коллекторы различного возраста и генезиса. Однако доля изношенных зёрен МИК из посторонних источников в ореолах рассеяния рядом с кимберлитовым телом незначительная и, как правило, не превышает первых процентов.

На конкретных примерах Л. А. Зиминим было установлено, что содержания трещиноватых зёрен пироба и пикроильменита, а также зёрен с примазками связующей массы кимберлита резко падают по мере удаления от первоисточника буквально на расстоянии 3–3,5 км, а сколько-либо заметные их количества встречаются в ореоле непосредственно рядом с телом. Поэтому трещиноватые зёрна и минералы с примазками кимберлита наряду с таким показателем, как 100-процентное содержание зёрен I класса сохранности, по мнению данного исследователя, могут служить надёжным критерием ближайшего расположения кимберлитового тела. Хотя стоит отметить, что собственно трещиноватость минералов как показатель близости кимберлита должна использоваться осторожно и в сочетании с другими признаками. Отдельные трещиноватые зёрна пироба и пикроильменита, как показывает практика, могут переноситься в аллювиальной среде на десятки километров.

Наши практические наблюдения показывают, что о близком расположении кимберли-

тового тела может также свидетельствовать общее стопроцентное содержание зёрен МИК I+II классов сохранности. При этом процентное соотношение этих классов не столь важно. В пределах сложных ореолов с влиянием «постороннего» материала на незначительное удаление от коренного источника может указывать даже наличие в шлиховой минеральной ассоциации зёрен минералов I–II классов сохранности в количестве более 50 %. Наличие зёрен МИК I–II классов сохранности в количестве 70–80 % уже может свидетельствовать о ближайшем расположении кимберлитового тела.

На основе разработанной шкалы сохранности кимберлитовых минералов Л. А. Зиминим была построена диаграмма распределения МИК с различным механическим износом в зависимости от дальности транспортировки [11]. На исходной диаграмме автором были показаны кривые распространения зёрен пикроильменита I, II, III и IV классов сохранности, а также пироба I класса сохранности. Несмотря на то, что эффективность данной диаграммы проверена временем и её работоспособность подтверждена в реальных обстановках на многочисленных объектах в пределах ЯАП, у диаграммы наравне с преимуществами имеются и некоторые недостатки. Одним из неудобств её использования является то, что кривые содержания пикроильменита разной степени сохранности построены без всякой взаимосвязи друг с другом. На графике они располагаются субпараллельно [11], что предполагает при определении степени удалённости минерала от первоисточника использование только какого-либо одного из четырёх классов сохранности. В реальных же условиях в ореолах и потоках рассеяния в одной точке встречаются, как правило, одновременно минералы всех классов сохранности, так как по мере удаления от коренного источника происходит постепенное снижение процентного содержания зёрен I класса сохранности и увеличение концентрации зёрен II класса, а затем и других классов сохранности, и процентные содержания этих разных классов сохранности взаимосвязаны. Поэтому

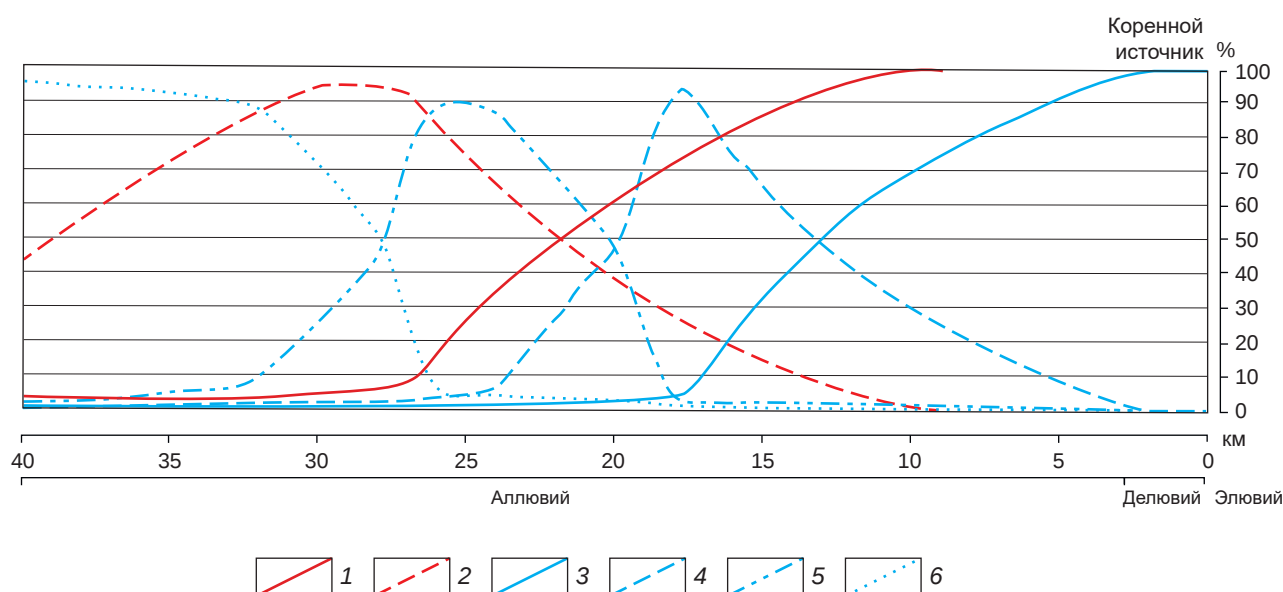
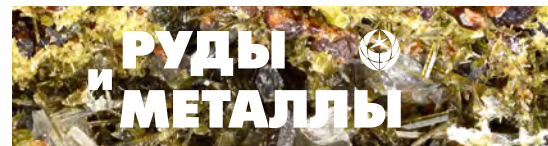


Рис. 3. Комплексная диаграмма распределения пиропы и пикроильменита разной степени сохранности в зависимости от дальности транспортировки в аллювиальных отложениях (применительно к районам с посторонними источниками):

кривые распределения содержаний пиропы: 1 – I класса сохранности, 2 – II класса сохранности; кривые распределения содержаний пикроильменита: 3 – I класса сохранности, 4 – II класса сохранности, 5 – III класса сохранности, 6 – IV класса сохранности

Fig. 3. Comprehensive diagram of the distribution of pyrope and picroilmenite of varying preservation degrees depending on their transport distance in alluvial deposits (applied to areas with external sources):

pyrope content distribution curves: preservation classes: 1 – Class I, 2 – Class II; picroilmenite content distribution curves: preservation classes: 3 – Class I, 4 – Class II, 5 – Class III, 6 – Class IV

полученные расстояния при определении степени удалённости от первоисточника отдельно по разным классам сохранности всегда будут различаться между собой и иногда могут быть трудно сопоставимы.

Рекомендации

В целях устранения отмеченного выше неудобства на основе диаграммы Л. А. Зимина была составлена комплексная диаграмма распределения пиропы и пикроильменита разной степени сохранности, которая представлена на рис. 3. Данная диаграмма позволяет оценивать дальность транспортировки МИК от коренного источника уже по совокупному распределению зёрен всех классов сохранности одновременно. Другими словами, диаграмма, представленная на рис. 3, позволяет

определять степень удаления от кимберлитового тела одновременно сразу по нескольким кривым, соответствующим разной степени сохранности для каждого минерала (пиропы или пикроильменита).

При составлении данной диаграммы, кроме собственных наблюдений, учитывались реальные шлихо-минералогические ситуации из отчётных данных, полученные в результате алмазописковых работ, проведённых сотрудниками Амакинской ГРЭ за период с 1981 по 1996 гг. В отличие от первоначальной диаграммы Л. А. Зимина, на которой кривые распределения содержаний пиропы и пикроильменита разных классов сохранности субпараллельны [11], на рис. 3 кривые содержания разного класса сохранности взаимно пересекаются. И это более логично, так как по

мере удаления от коренного источника происходит уменьшение содержания минералов высокой степени сохранности при одновременном увеличении доли изношенных зёрен. Для пикроильменита на диаграмме предусмотрены четыре кривые совокупного распределения зёрен I, II, III и IV классов сохранности. Для пиропы приведены лишь две кривые распределения, а именно только для зёрен I и II классов сохранности. Кривые распределения пиропы III и IV классов сохранности выходят за пределы оцениваемого 40-километрового отрезка гидросети и на диаграмме не показаны. Как видно из рис. 3, уже кривая распределения для зёрен пиропы II класса сохранности своим окончанием с содержанием 40 % выходит за пределы выбранного расстояния. Данное обстоятельство свидетельствует в пользу того, что для оценки дальности сноса МИК с параметрами от ближнего до умеренного решающее значение имеют зёрна преимущественно I и II классов сохранности. Остальные классы сохранности (III и IV) имеют вспомогательное значение и являются показателем значительного удаления минеральной ассоциации от коренного источника. Данное утверждение относится не только к пиропу, но и к пикроильмениту. На представленной диаграмме (рис. 3), где в отличие от пиропы для пикроильменита III–IV классов сохранности приведены соответствующие кривые № 5 и № 6, уже кривая распределения пикроильменита III класса (№ 5) со сколько-либо заметным содержанием зёрен данной сохранности располагается на значительном удалении от первоисточника. Так, содержание зёрен пикроильменита III класса сохранности в количестве 10–20 % при одновременном практически полном отсутствии зёрен I–II классов сохранности соответствует расстоянию в 30–32 км. Изношенные зёрна пикроильменита IV класса сохранности ещё значительно удалены от коренного источника, о чём наглядно свидетельствует кривая распределения пикроильменита № 6 данной сохранности. Процентное содержание пикроильменита IV класса сохранности в количе-

стве более 50 % свидетельствует о дальнейшем сносе зёрен с износом данного класса. Тем не менее наличие графиков распределения пикроильменита для каждого из четырёх классов сохранности позволяет использовать одновременно все кривые при определении степени удаления минерала от коренного источника.

В качестве дополнения на рис. 3 приведена кривая распределения зёрен пиропы II класса сохранности для бассейнов с посторонними источниками, которая на первоначальной диаграмме Л. А. Зимина отсутствовала. Ещё одним новшеством приведённой диаграммы является то, что на представленном графике при достижении минералами разной степени сохранности 10-процентного содержания дальнейшее падение концентраций идёт не по такой же закономерности, приводящей к их полному исчезновению, а более плавно. К примеру, кривая распределения пикроильменита I класса сохранности, достигая уровня 10 % на удалении 17–18 км от первоисточника, выполаживается, после чего происходит плавное уменьшение концентрации данного класса сохранности на значительном расстоянии от кимберлитового тела. Как следует из рис. 3, даже на расстоянии 40 км от коренного источника отмечаются первые проценты зёрен I класса сохранности. Опыт работ показывает, что единичные зёрна МИК хорошей сохранности имеют достаточно широкое фоновое распространение и встречаются на значительном удалении от кимберлитовых тел вне всякой видимой связи с известными коренными источниками. Данному феномену можно найти логическое объяснение, и некоторые возможные условия, при которых происходит перемещение МИК на значительные расстояния без существенного износа, мы описывали ранее [11]. В частности, в качестве одного из механизмов такого перемещения может выступать перенос МИК донным льдом в весенний период вместе с вмёрзшим в него галечником. При таком механизме кимберлитовые минералы хорошей сохранности могут пассивно переноситься по водотокам льдом на большие расстояния, постепенно



высвобождаясь на всём пути своего следования, при этом практически не изнашиваясь.

Особо отметим, что применение приведённой выше диаграммы корректно при определении дальности переноса минералов только для континентальных условий и только для районов с развитием промежуточных коллекторов, поставляющих дополнительный минералогический материал в ореолы и потоки рассеяния. И хотя характер кривых распределения содержаний пиропса и пикроильменита как в «стерильных» районах, так и в условиях «помех» один и тот же, всё же в «стерильных» районах дальность распространения МИК хорошей сохранности увеличивается на 10–15 км от коренного источника. Однако такие «простые» ореолы с кимберлитовыми минералами исключительно прямого сноса встречаются крайне редко и характерны преимущественно для открытых, хорошо изученных территорий, где алмазопромысловые работы в настоящее время практически свёрнуты.

Применение диаграммы, приведённой на рис. 3, к ореолам, сформировавшимся в прибрежно-морских литодинамических обстановках, лишено здравого смысла по той причине, что в данных условиях поведение МИК значительно отличается от континентальных. Приобретаемые в прибрежно-морских условиях характерные особенности минеральной ассоциации будут зависеть от таких факторов, как стабильность береговой линии, особенности берега (его крутизна), динамика водной среды, и некоторых иных. Следует признать, что поведение кимберлитовых минералов в морских условиях на сегодня изучено крайне недостаточно. Вполне определённо можно лишь утверждать, что в прибрежно-морских условиях МИК приобретают максимальную степень механического износа. При этом предельная окатанность зёрен может возникать на месте в процессе возвратно-поступательного движения волн, вне зависимости от удаления от коренного источника. Одновременно в таких условиях происходит глубокая сортировка минеральной ассоциации по гранулометрии и плотности.

При составлении комплексной диаграммы (рис. 3) процентное содержание зёрен рассчитывалось на исходную шлиховую пробу объёмом 20 литров. Поэтому приведённые графики распределения содержаний пиропса и пикроильменита различной степени сохранности справедливы также только по отношению к данному объёму проб. Иной объём проб приведёт к несколько другим процентным содержаниям МИК, в первую очередь минералов хорошей сохранности, что будет соответствовать несколько иным расстояниям их переноса. Кроме этого, для построения кривых распределения МИК использовался наиболее представительный гранулометрический класс $-1+0,5$ мм.

Практическое использование диаграммы, представленной на рис. 3, достаточно простое. Например, если в конкретной пробе (ореоле) содержание пиропса I класса сохранности составляет 15 % при одновременном количестве зёрен II класса, равном 85 %, то данные соотношения соответствуют удалению минерала от коренного источника на расстояние 26 км. Или, допустим, если содержания пикроильменита разной степени сохранности в какой-то конкретной точке имеют следующие соотношения: I класс – 2 %, II класс – 27 %, III – 68 % и IV класс – 3 %, то по диаграмме данные соотношения соответствуют расстоянию примерно в 27 км. Содержанию пикроильменита I класса сохранности, равному 67 %, при одновременном количестве зёрен II класса 30 % и единичных зёрнах III–IV классов сохранности (первые проценты) соответствует расстояние до коренного источника в 10–11 км. Безусловно, в реальных условиях такое пропорциональное распределение зёрен разной степени сохранности, которое бы строго соответствовало содержаниям по кривым для определённого расстояния, редко встречается. Как правило, в конкретных шлихо-минералогических обстановках соотношения зёрен различной степени сохранности в ореолах характеризуются определённой диспропорцией. К примеру, содержание пикроильменита I класса сохранности, равное 20 %, при



одновременном содержании зёрен данного минерала II класса в 30 % не соответствует на диаграмме какому-то одному конкретному расстоянию или «узкому» интервалу (рис. 3). Для зёрен I класса сохранности это расстояние будет соответствовать примерно 16 км, а для зёрен II класса оно равно ~ 22 км. Поэтому в большинстве случаев в реальных условиях оцениваемое по диаграмме удаление определённого минерала от коренного источника будет определяться расстоянием «от-и-до», или «минимум-максимум».

Следует обратить внимание на то, что кривая распределения пиропы I класса сохранности (№ 1) более близка к кривой пикроильменита II класса (№ 4), а II класс сохранности пиропы (кривая № 2) по удалённости от источника значительно превосходит даже III класс сохранности пикроильменита (кривая № 5). Из этого следует, что при равном удалении от коренного источника в конкретной точке пикроильмениту II класса сохранности более будут соответствовать менее изношенные зёрна пиропы I класса при условии, что оба минерала являются производными одного источника. Данные выводы не расходятся с результатами исследований В. П. Афанасьева [2, 3].

Несмотря на то, что приведённые кривые являются эмпирическими, всё же следует отметить, что определяемые расстояния будут приблизительными, так как, во-первых, невозможно определить степень влияния посторонних источников кимберлитовых минералов в конкретном районе, во-вторых, невозможно учесть влияние такого фактора, как скорость течения водотока, которая для каждого конкретного случая будет индивидуальной. Кроме этого, на дальность перемещения МИК существенное влияние оказывают их размер и содержание в первоисточнике, гранулометрический и петрографический состав среды переноса и некоторые другие факторы (неотектоника, климат и т. д.). Из всех перечисленных факторов наиболее важным, безусловно, является вопрос влияния МИК из промежуточных коллекторов на распределение и дальность перемещения в ореолах и потоках рассеяния кимберлитовых минералов прямого сноса. На сегодня не вызывает сом-

нения лишь тот факт, что между содержанием изношенных МИК в древних коллекторах и дальностью распространения кимберлитовых минералов хорошей сохранности в аллювии при разрушении кимберлитовых тел существует обратная зависимость: чем больше содержится в промежуточном коллекторе изношенных зёрен, тем меньше процент зёрен хорошей сохранности из коренного источника в современном аллювии и, как следствие, меньше дальность их распространения по водотоку. Количественное выражение данной зависимости должно базироваться на значительном объёме наблюдений и экспериментальных данных.

Тем не менее проверка работоспособности диаграммы на хорошо изученных объектах в пределах ЯАП показала неплохую сходимость результатов с эмпирическими кривыми распределения МИК различной степени сохранности (рис. 3). Так, к примеру, в районе устья р. Улаах-Муна, на расстоянии 20–26 км ниже трубок Верхне-Мунского кимберлитового поля, максимальное содержание пиропы I класса сохранности по данным поисковых работ Амакинской ГРЭ составляет 10–15 %. При этом содержание пиропы II класса сохранности по отдельным пробам здесь достигает 50–60 %, что на диаграмме рис. 3 соответствует расстоянию 22–27 км. Ниже по течению р. Муна содержание зёрен I класса значительно падает и на удалении 40 км от кимберлитового поля обычно не превышает 2–3 %, а содержание зёрен пиропы II класса колеблется в пределах 30–50 %, что, согласно диаграмме, соответствует расстоянию 39 км и более. Единичные зёрна пиропы I класса сохранности улавливаются по руслу р. Муна на удалении 150 км, а II класса – до 200 км ниже трубок.

Закключение

Приведённая усовершенствованная комплексная диаграмма распределения пиропы и пикроильменита в зависимости от дальности транспортировки на основе сохранности первичных поверхностей позволяет количественно определить степень удаления кимберлитовых минералов от коренного источника,



что может оказать существенную помощь в решении задачи локализации шлиховых ореолов. Исходя из того, что механический износ кимберлитовых минералов является функцией расстояния, принадлежность к одному и тому же коренному источнику «свежих» изношенных кимберлитовых минералов и полностью утративших первоначальный облик изношенных зёрен, присутствующих в одном и том же месте в сколько-либо заметных количествах, является маловероятной. Данный вывод имеет важное практическое значение, в пользу правомочности которого наглядно свидетельствует рекомендованная комплексная диаграмма зависимости износа МИК от пройденного расстояния (рис. 3). Безусловно, этот вывод справедлив при условии, что и «свежие», и существенно изношенные минералы являются первичными (не перетолженными). При этом источником как минера-

лов хорошей сохранности, так и изношенных зёрен должны являться отложения континентального генезиса, что предполагает линейный характер распределения МИК в ореолах рассеяния. Это подтверждается практическим опытом авторов при исследованиях химизма кимберлитовых минералов на многочисленных объектах ЯАП. В процессе таких исследований было установлено, что в подавляющем большинстве случаев МИК хорошей сохранности показывали кардинальное отличие химического состава от состава существенно изношенных зёрен в пределах одних и тех же ореолов [12].

Применение комплексной диаграммы распределения гранатов I и II классов сохранности и пикроильменитов I–IV классов сохранности в зависимости от дальности их транспортировки будет способствовать повышению эффективности алмазопроизводственных работ.

Список литературы

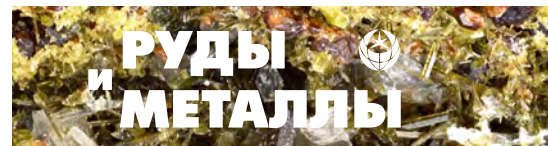
1. Афанасьев В. П. Закономерности эволюции кимберлитовых минералов и их ассоциаций при формировании шлиховых ореолов // Геология и геофизика. – 1991. – № 2. – С. 78–85.
2. Афанасьев В. П., Соболев Н. В., Кириллова Е. А., Юсупов Т. С. Относительная абразивная устойчивость пиропы и пикроильменита – индикаторных минералов кимберлитов // Доклады РАН. – 1994. – Т. 337, № 3. – С. 359–362.
3. 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.
4. Подвысоцкий В. Т., Белов Е. Н. Состав и условия формирования древних осадочных коллекторов и россыпей алмазов. – Якутск : ЯНЦ СО РАН, 1995. – 164 с.
5. Прокопчук Б. И., Кострюков М. С., Королева М. Н. Сохранность пиропы в зависимости от условий транспортировки рыхлых отложений // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 1964. – № 5. – С. 58–63.
6. Плотникова М. И., Салтыков О. Г., Кардопольцева О. И. Закономерности размещения алмазных россыпей Приленского района (Западная Якутия) // Геология и геофизика. – 1967. – № 11. – С. 31–37.
7. Скрыбина Л. И., Ягнышев Б. С. Полевой определитель шлиховых минералов из аллювиальных осадков Якутии / отв. ред. И. И. Колодезников. – Якутск : ГУП РС(Я) ЦГАЛ, 2005. – 224 с.
8. Харьков А. Д. Минералогические основы поисков алмазных месторождений. – М. : Недра, 1978. – 136 с.
9. Харьков А. Д., Квасница В. Н., Сафронов А. Ф., Зинчук Н. Н. Типоморфизм алмаза и его минералов спутников из кимберлитов. – Киев : Наукова думка, 1989. – 184 с.
10. Харьков А. Д., Зинчук Н. Н., Крючков А. И. Геолого-генетические основы шлихо-минералогического метода поисков алмазных месторождений. – М. : Недра, 1995. – 348 с.
11. Хмельков А. М. Оценка дальности переноса кимберлитовых минералов при алмазопроизводственных работах // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона : Материалы Всерос. совещ. – Сыктывкар : ИГ НЦ УрО РАН, 2006. – С. 38–40.

12. Хмельков А. М. Основные минералы кимберлитов и их эволюция в процессе ореолообразования (на примере Якутской алмазонасной провинции). – Новосибирск : Изд-во АРТА, 2008. – 252 с.

13. 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.

References

1. Afanas'ev V. P. Zakonomernosti evolyutsii kimberlitovykh mineralov i ikh assotsiatsii pri formirovani shlikhovykh oreolov [Patterns of evolution of kimberlite minerals and their associations during the formation of alluvial halos], *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 1991, No 2, pp. 78–85. (In Russ.)
2. Afanas'ev V. P., Sobolev N. V., Kirillova E. A., Yusupov T. S. Otnositel'naya abrazivnaya ustoichivost' piropa i pikroil'menita – indikatornykh mineralov kimberlitov [Relative abrasive resistance of pyrope and picroilmenite – indicator minerals of kimberlites], *Doklady RAN* [Proceeding of the Russian Academy of Science], 1994, Vol. 337, pp. 359–362. (In Russ.)
3. Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Pokhilenko N. P. Morfologiya i morfogenez indikatornykh mineralov kimberlitov [Morphology and morphogenesis of kimberlite indicator minerals], Novosibirsk, Branch "Geo", SB RAS Publ., 2001, 276 p.
4. Podvysotskii V. T., Belov E. N. Sostav i usloviya formirovaniya drevnikh osadochnykh kollektorov i rossypei almazov [Composition and conditions of formation of ancient sedimentary reservoirs and diamond placers], Yakutsk, Yakut Scientific Center of the SB RAS Publ., 1995, 164 p.
5. Prokopchuk B. I., Kostryukov M. S., Koroleva M. N. Sokhrannost' piropa v zavisimosti ot uslovii transportirovki rykhlykh otlozhenii [Preservation of pyrope depending on the conditions of transportation loose sediments], *Izvestiya VUZov. Geologiya i razvedka* [Proceeding of higher educational establishments, Geology and Exploration], 1964, No 5, pp. 58–63. (In Russ.)
6. Plotnikova M. I., Saltykov O. G., Kardopol'tseva O. I. Zakonomernosti razmeshcheniya almazonosnykh rossypei Prilenskogo raiona (Zapadnaya Yakutiya) [Patterns of distribution of diamond-bearing placers in the Prilensky district (Western Yakutia)], *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 1967, No. 11, pp. 31–37. (In Russ.)
7. Skryabina L. I., Yagnyshev B. S. Polevoi opredelitel' shlikhovykh mineralov iz allyuvial'nykh osadkov Yakutii [Field guide to heavy mineral concentrates from alluvial deposits of Yakutia], otv. redaktor I. I. Kolodeznikov [ed. by I. I. Kolodeznikov], Yakutsk, GUP RS(Ya) CGAL Publ., 2005, 224 p.
8. Khar'kiv A. D. Mineralogicheskie osnovy poiskov almaznykh mestorozhdenii [The mineralogical foundations of diamond deposits prospecting], Moscow, Nedra Publ., 1978, 136 p.
9. Khar'kiv A. D., Kvasnitsa V. N., Safronov A. F., Zinchuk N. N. Tipomorfizm almaza i ego mineralov sputnikov iz kimberlitov [Typomorphism of diamond and its satellite minerals from kimberlites], Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989, 184 p.
10. Khar'kiv A. D., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I. Geologo-geneticheskie osnovy shlikho-mineralogicheskogo metoda poiskov almaznykh mestorozhdenii [Geological and genetic foundations of the alluvial-mineralogical method for prospecting diamond deposits], Moscow, Nedra Publ., 1995, 348 p.
11. Khmelkov A. M. Otsenka dal'nosti perenosa kimberlitovykh mineralov pri almazoposkovykh rabotakh [Assessment of the transport distance of kimberlite minerals during diamond exploration work], In: *Almazy i blagorodnye metally Timano-Ural'skogo regiona. Materialy Vserossiyskogo soveshchaniya* [Diamonds and precious metals of the Timan-Ural region. Proceedings of the All-Russian Meeting], 2006, Syktyvkar, IG NC UB RAS Publ., pp. 38–40. (In Russ.)
12. Khmelkov A. M. Osnovnye mineraly kimberlitov i ikh evolyutsiya v protsesse oreolobrazovaniya (na primere Yakutskoi almazonosnoi provintsi) [Main kimberlite minerals and their evolu-



tion in the ore halo formation process (using the example of the Yakutian diamond province)], Novosibirsk, ARTA Publ., 2008, 252 p.

13. Khmelkov A. M., Chuguevskaya E. A. Osnovnye morfogeneticheskie kharakteristiki mineralov-in-

dikatorov kimberlitov [The principal morphogenetic characteristics of kimberlite indicator minerals], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2025, No 1, pp. 40–56. (In Russ.) DOI: 10.47765/0869-5997-2025-10003.

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

Чугуевская Эльвира Александровна
геолог I категории

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

Aleksandr Mikhailovich Khmelkov (st_56@mail.ru)
Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, veteran of ALROSA

Elvira Aleksandrovna Chuguevskaya
geologist I category

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