



Парагенетическое разнообразие состава гранатов из кимберлитов Накынского поля (Якутия)

Paragenetic diversity of the composition garnets from kimberlites Nakyn field (Yakutia)

Хмельков А. М., Власова Э. А., Иванов А. С.

Khmelkov A. M., Vlasova E. A., Ivanov A. S.

Изучен состав гранатов из трёх кимберлитовых тел Накынского поля (трубки Нюрбинская и Ботуобинская, дайка Мархинская). Определена парагенетическая специализация гранатов на основе их химического состава с помощью оригинальной программы MineralogicalAnalyse. Данная программа специально создавалась для парагенетической классификации кимберлитовых минералов и способна на данный момент распознавать по составу гранатов 41 парагенезис. Определяемый программой набор парагенетических групп на сегодня наиболее полно характеризует парагенетическое разнообразие состава гранатов из кимберлитов и связанных с ними россыпей. Установлено, что кимберлитовые тела Накынского поля существенно различаются как набором гранатовых парагенезисов, так и их процентным соотношением. Отличительной особенностью гранатов данного поля является повышенное содержание среди них разностей эклогитовых парагенезисов. Ксенолиты метаморфических пород фундамента не оказали заметного влияния на парагенетическую ассоциацию гранатов из изученных кимберлитовых тел. Использование программы MineralogicalAnalyse позволяет судить как о парагенетической принадлежности гранатов, так и о глубинных источниках алмазов конкретных кимберлитовых тел.

Ключевые слова: Накынное поле, кимберлиты, гранаты, парагенезис, алмазоносный.

Studied the composition of garnets from three kimberlite bodies of Nakyn field (Nyurbinskaya and Botuobinskaya pipes, Markhinskaya dyke). Paragenetic specialization of garnets was determined on the basis of their chemical composition with use of the original MineralogicalAnalyse program. This program was specially created for paragenetic classification of kimberlite minerals and is currently capable of recognizing 41 paragenesis by the composition of garnets. The set of paragenetic groups determined by the program most fully characterizes paragenetic diversity of the composition garnets from kimberlites and associated placers to date. A significant difference was established between the kimberlite bodies of Nakyn field, both in the set of different garnet paragenesis and in their percentage. A distinctive feature of garnets this field is the increased content of eclogite paragenesis among them. Xenoliths of metamorphic basement rocks did not significantly affect the paragenetic association of garnets from studied kimberlite bodies. Using of the MineralogicalAnalyse program allows one to judge both paragenetic affiliation of garnets and the deep sources of diamonds of specific kimberlite bodies.

Key words: Nakyn field, kimberlites, garnets, paragenesis, diamondiferous.

Для цитирования: Хмельков А. М., Власова Э. А., Иванов А. С. Парагенетическое разнообразие состава гранатов из кимберлитов Накынского поля (Якутия). Руды и металлы. 2021. № 3. 131–141. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10024.

For citation: Khmelkov A. M., Vlasova E. A., Ivanov A. S. Paragenetic diversity of the composition garnets from kimberlites Nakyn field (Yakutia). Ores and metals, 2021, № 3, 131–141. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10024.

Введение. Значительная часть макрокристаллических выделений минералов в кимберлитах ксеногенной природы, их происхождение связано с дезинтеграцией мантийных пород. При этом химический состав минералов-индикаторов кимберлитов несёт информацию о процессах глубинного минералообразования. В этой связи парагенезис гранатов косвенно связан с алмазонасностью кимберлитовых пород. Поэтому выяснение парагенетической специализации гранатов в кимберлитах имеет важное практическое значение, так как позволяет судить в том числе о глубинных источниках алмазов конкретных кимберлитовых тел.

Накынское кимберлитовое поле расположено в пределах Средне-Мархинского алмазонасного района Якутской алмазонасной провинции (ЯАП), на левобережье р. Марха в её среднем течении. Данное поле открыто геологами Ботуобинской экспедиции (БГРЭ) АК «АЛРОСА» в 1994 г., и на сегодня в его пределах известны шесть кимберлитовых тел: трубки Ботуобинская и Нюрбинская, тела даечного типа Мархинское и Майское и жилы кимберлитов.

Все кимберлитовые тела Накынского поля алмазонасные. Наиболее высоким содержанием алмазов отличаются высокомагнезиальные кимберлиты трубок Нюрбинская, Ботуобинская (> 4 кар/т) и тело Майское (> 3 кар/т). Дайкообразное тело Мархинское характеризуется средней алмазонасностью (< 1 кар/т).

Кимберлитовые тела прорывают кембрийские и ордовикские карбонатные породы и полностью перекрыты терригенной толщей юрских отложений мощностью 60–80 м. Возраст внедрения кимберлитов Накынского поля среднепалеозойский (366–380 млн лет) [6].

Отличительными особенностями кимберлитов Накынского поля являются преобладание среди кимберлитовых минералов гранатов при низком содержании хромшпинелидов и практически полное отсутствие пикроильменита. Гранаты в кимберлитовых породах представлены полной цветовой гаммой: от розовых до тёмно-фиолетовых, почти чёрных при внешнем освещении разностей (рис. 1). Бла-



Рис. 1. Внешний вид гранатов из тр. Нюрбинская

Fig. 1. Appearance of garnets from Nurbinskaya pipe

годаря повышенному содержанию хрома (до 15 мас. % Cr_2O_3) отдельные зёрна гранатов имеют такой насыщенный тёмно-фиолетовый цвет. Отмечается высокая доля оранжевых гранатов во всех кимберлитовых телах данного поля, содержание которых по данным геологов БГРЭ по отдельным пробам достигает 50 % и более от их общего количества.

В целом для трубок Накынского кимберлитового поля характерна высокая, по сравнению с другими месторождениями ЯАП, доля включений эклогитового парагенезиса, в сумме достигающая 20 % от общего количества алмазов с сингенетическими включениями [4].

Методика исследований. Пересчёту и детальному исследованию были подвергнуты химические составы гранатов из трёх кимберлитовых тел Накынского поля – трубок Нюрбинская, Ботуобинская и дайкообразного тела Мархинское. Химический состав гранатов из данных кимберлитовых тел предварительно был проанализирован в ЦАЛ АК «АЛРОСА» на электронно-зондовой системе Superprobe-8800R фирмы JEOL (Япония) с пятиканальным волновым микроанализатором JXA-8800R и рентгеноспектральной приставкой LINK-ISIS 300 фирмы Oxford (Англия) с энергетическим разрешением 133 Эв. Концентрации элементов определялась с относительной ошибкой менее



5 % и чувствительностью до 10n ppm. Полный количественный анализ выполнялся при ускоряющем напряжении 20 кВт и токе пучка 10 нА.

Для определения парагенетической принадлежности гранатов их химические составы, полученные после микронзондового анализа, были обработаны и пересчитаны с помощью специализированной компьютерной программы MineralogicalAnalyse. Данная программа специально создавалась для парагенетической классификации кимберлитовых минералов на основе их химизма и способна на данный момент распознавать по составу гранатов 41 парагенезис [7].

Алгоритм пересчёта микронзондовых анализов и отнесения гранатов к определённому парагенезису, заложенный в программе MineralogicalAnalyse, основан не на расчёте дискриминантных функций [2, 3], а на использовании исключительно химических составов минералов. Определение парагенезиса гранатов осуществляется программой путём сопоставления их состава с составами минералов из эталонных парагенезисов, внесённых в базу данной программы, с привлечением статистических методов на основе макросов. Программа учитывает процентное содержание каждого оксида (в мас. %) и определяет парагенетическую специализацию гранатов по минимальному значению евклидова расстояния с учётом среднего значения и доверительных интервалов по оксидам (минимальный – максимальный). По результатам пересчёта каждому индивидуальному составу программа автоматически присваивает аббревиатуру из начальных букв соответствующего парагенезиса гранатов [7].

Основу эталонной базы программы MineralogicalAnalyse по гранатовым парагенезисам составили химические составы гранатов из опубликованных источников преимущественно из глубинных нодулей [1, 2, 5, 9, 10, 11, 12]; база была существенно дополнена собственными данными.

Программа MineralogicalAnalyse адаптирована под MS Excel. При инсталляции MineralogicalAnalyse в панели листа Excel появляется дополнительная вкладка «Минанализ». В меню данной вкладки выбирается нужный ми-

нерал и необходимый алгоритм пересчёта составов с учётом общего железа или его разделения на закисную и окисную формы. По результатам пересчёта программа может в автоматическом режиме создавать сводную таблицу и отстраивать гистограмму распределения минерала по парагенетическим группам.

Большинство гранатовых парагенезисов, составы которых внесены в эталонную базу программы MineralogicalAnalyse, определены петрографически при изучении глубинных ксенолитов. Часть определена косвенным методом по составу, в основном это алмазоносные парагенезисы (в том числе из включений в алмазах).

К гранатам высокоалмазоносных парагенезисов отнесены разности, встречающиеся в качестве включений в алмазах или сростков с ними с типоморфным для них составом. К гранатам алмазоносных парагенезисов – разности исключительно из алмазоносных ксенолитов, также обладающие характерным составом. К разностям потенциально алмазоносных парагенезисов отнесены гранаты, встречающиеся преимущественно в алмазоносных ксенолитах и лишь незначительно – в неалмазоносных. Гранаты слабоалмазоносных парагенезисов в основном представлены разностями из неалмазоносных ксенолитов с единичными находками в алмазоносных нодулях с соответствующим составом. К гранатам неалмазоносных парагенезисов отнесены разности, установленные исключительно в неалмазоносных ксенолитах с типичным для них составом.

Всего с использованием программы MineralogicalAnalyse было пересчитано и проанализировано 4614 химических составов гранатов, в том числе из тр. Нюрбинская – 2978 анализов, из тр. Ботубинская – 787, из дайки Мархинская – 849.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты парагенетической классификации гранатов из кимберлитов Накынского поля на основе их состава приведены на рис. 2. Как видно из данного рисунка, гранаты из трёх проанализированных кимберлитовых тел характеризуются значительным разнообразием парагенезисов. Так, среди гранатов из тр. Нюр-

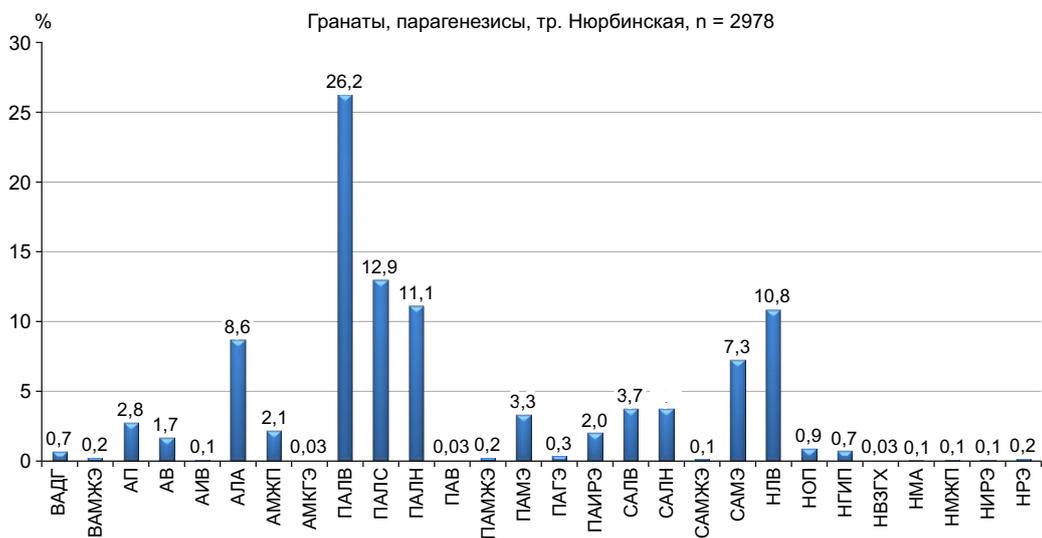


Рис. 2. Распределение гранатов из кимберлитовых тел Накынского поля по парагенезисам:

ВАДГ – высокоалмазоносные дуниты и гарцбургиты; ВАМЖЭ – высокоалмазоносные магнезиально-железистые эклогиты; АП – алмазоносные перидотиты; АЛА – алмазоносные лерцолиты с аномально хромистым гранатом; АИВ – алмазоносные ильменитовые верлиты; АВ – алмазоносные вебстериты; АМЖП – алмазоносные магнезиально-железистые пироксениты; АМКГЭ – алмазоносные магнезиальные кальциево-глиноземистые эклогиты; ПАЛВ – потенциально алмазоносные лерцолиты с высокохромистым гранатом; ПАЛС – потенциально алмазоносные лерцолиты со среднехромистым гранатом; ПАЛН – потенциально алмазоносные лерцолиты с низкохромистым гранатом; ПАВ – потенциально алмазоносные верлиты; ПАИРЭ – потенциально алмазоносные ильменит-рутиловые эклогиты; ПАМЖЭ – потенциально алмазоносные магнезиально-железистые эклогиты; ПАГЭ – потенциально алмазоносные глиноземистые эклогиты; ПАМЭ – потенциально алмазоносные магнезиальные эклогиты; САЛВ – слабоалмазоносные лерцолиты с высокохромистым гранатом; САЛН – слабоалмазоносные лерцолиты с низкохромистым гранатом; САМЭ – слабоалмазоносные магнезиальные эклогиты; САМЖЭ – слабоалмазоносные магнезиально-железистые эклогиты; НЛВ – неалмазоносные лерцолиты и вебстериты; НИВ – неалмазоносные ильменитовые верлиты; НМА – неалмазоносные магнезиальные алькремиты; НМКА – неалмазоносные магнезиально-кальциевые алькремиты; НМЖП – неалмазоносные магнезиально-железистые пироксениты; НРЭ – неалмазоносные рутиловые эклогиты (высокожелезистые); НИРЭ – неалмазоносные ильменит-рутиловые эклогиты; НГИП – неалмазоносные гранат-ильменитовые перидотиты и пироксениты; НОП – неалмазоносные ортопироксениты; НВЗГХ – зональные гранаты с включениями хромшпинелидов из неалмазоносных ксенолитов, в том числе верлитов; НВЗГИ – зональные гранаты с включениями ильменита из неалмазоносных ксенолитов, в том числе верлитов; НВГИС – гранат-ильменитовые сростки из неалмазоносных ксенолитов, в том числе верлитов

Fig. 2. Distribution of garnets from kimberlite bodies of Nakyn field based on paragenesis:

ВАДГ – highly diamondiferous dunites and harzburgites; ВАМЖЭ – highly diamondiferous magnesian-ferruginous eclogites; АП – diamondiferous peridotites; АЛА – diamondiferous lherzolites with anomalous chromium garnet; АИВ – diamondiferous ilmenite wehrlites; АВ – diamondiferous websterites; АМЖП – diamondiferous magnesian-ferruginous pyroxenites; АМКГЭ – diamondiferous magnesian calcium-aluminous eclogites; ПАЛВ – potentially diamondiferous lherzolites with high-chromium garnet; ПАЛС – potentially diamondiferous lherzolites with medium-chromium garnet; ПАЛН – potentially diamondiferous lherzolites with low-chromium garnet; ПАВ – potentially diamondiferous wehrlites; ПАИРЭ – potentially diamondiferous ilmenite-rutile eclogites; ПАМЖЭ – potentially diamondiferous magnesian-ferruginous eclogites; ПАГЭ – potentially diamondiferous alumina eclogites; ПАМЭ – potentially diamondiferous magnesian eclogites; САЛВ – weakly diamondiferous lherzolites with high-chromium garnet; САЛН – poorly diamondiferous lherzolites with low-chromium garnet; САМЭ – poorly diamondiferous magnesian eclogites; САМЖЭ – poorly diamondiferous magnesian-ferruginous eclogites; НЛВ – non-diamondiferous lherzolites and websterites; НИВ – non-diamondiferous ilmenite wehrlites; НМА – non-diamondiferous magnesian alcremites; НМКА – non-diamondiferous magnesian-calcium alcremites; НМЖП – non-diamondiferous magnesian-ferruginous pyroxenites; НРЭ – non-diamondiferous rutile eclogites (Fe-rich); НИРЭ – non-diamondiferous ilmenite-rutile eclogites; НГИП – non-diamondiferous garnet-ilmenite peridotites and pyroxenites; НОП – non-diamondiferous orthopyroxenites; НВЗГХ – zonal garnets banded with Cr-spinels from non-diamondiferous xenoliths including wehrlites; НВЗГИ – zonal garnets banded with ilmenite from non-diamondiferous xenoliths including wehrlites; НВГИС – garnet-ilmenite intergrowths from non-diamondiferous xenoliths including wehrlites

бинская программа MineralogicalAnalyse идентифицировала 28 парагенезисов, из тр. Ботуобинская – 27, в дайке Мархинская гранаты по составу соответствуют 23 парагенезисам. В общей сложности по трём проанализированным кимберлитовым телам Накынского поля программа определила 32 различные парагенетические группы гранатов. Вариации состава гранатов по выделенным группам приведены в таблице в виде минимальных и максимальных значений по оксидам.

Помимо выделенного разнообразия парагенезисов среди гранатов рис. 2 наглядно демонстрирует, что все три проанализированных кимберлитовых тела существенно различаются набором гранатовых парагенезисов и их процентным соотношением. В тр. Нюрбинская большая часть гранатов (26,2 %) по составу соответствует разностям из потенциально алмазоносных лерцолитов с высокохромистым гранатом (ПАЛВ-парагенезис), тогда как в тр. Ботуобинская наибольшим распространением пользуются гранаты из слабоалмазоносных магнезиальных эклогитов (САМЭ-парагенезис) – 14,7 %. В кимберлитах из дайки Мархинская большинство гранатов (22,6 %) представлено высокожелезистыми разностями (см. табл.) из потенциально алмазоносных ильменит-рутиловых эклогитов (ПАИРЭ-парагенезис).

Характерной особенностью гранатов из кимберлитов Накынского поля является то, что во всех трёх телах отмечены разности из высокоалмазоносных магнезиально-железистых эклогитов (ВАМЖЭ-парагенезис), которые обычно присутствуют в высокоалмазоносных кимберлитовых телах. Причём наибольший процент гранатов данного парагенезиса (0,9 %) отмечен в среднеалмазоносной дайке Мархинская (см. рис. 2). Также во всех трёх телах среди гранатов алмазоносных парагенезисов присутствуют разности из алмазоносных магнезиально-железистых пироксенитов (АМЖП-парагенезис), содержание которых колеблется от 2,1 % в тр. Нюрбинская до 7,4 % в тр. Ботуобинская и 18,5 % в дайке Мархинская. Кроме этого, в трубках Нюрбинская и Ботуобинская по составу идентифицированы достаточно ред-

ко встречающиеся гранаты из алмазоносных магнезиальных кальциево-глиноземистых эклогитов (АМКГЭ-парагенезис). Данные гранаты характеризуются повышенной глинозёмистостью и магнезиальностью при одновременно высоком содержании кальция и низкой примеси хрома (см. табл.). По компонентному составу гранаты АМКГЭ-парагенезиса относятся к альмандин-гроссуляр-пиропам [7].

Другая, редко встречающаяся разновидность гранатов, имеющая место во всех трёх проанализированных кимберлитовых телах, разность из алмазоносных вебстеритов (АВ-парагенезис). Эти гранаты представлены низкохромистыми и низкомагнезиальными разностями (см. табл.) с достаточно высоким содержанием суммарного железа (до 21,73 мас. % FeO_{tot}) и натрия (до 0,2 мас. % Na_2O). По компонентному составу они относятся к альмандин-пиропам и ранее были обнаружены в качестве включений в алмазах из тр. Нюрбинская [9, 12].

Особо стоит отметить наличие среди алмазоносных парагенезисов аномально хромистых гранатов из алмазоносных лерцолитов (АЛА-парагенезис), которые присутствуют во всех трёх кимберлитовых телах и наравне с отмеченными выше гранатами других парагенезисов характеризуют кимберлиты Накынского поля. Для аномально хромистых гранатов из алмазоносных лерцолитов характерна повышенная хромистость, как правило, превышающая 10 мас. % Cr_2O_3 при одновременно высоком содержании кальция (см. табл.). Гранаты этого парагенезиса имеют весовую долю уваровитового компонента [7]. Разности с подобным составом также были отмечены в качестве включений в алмазах из тр. Нюрбинская [9, 12]. Наиболее высокое содержание гранатов АЛА-парагенезиса характерно для тр. Нюрбинская (8,6 %), несколько меньшее – для тр. Ботуобинская (1,9 %) и дайки Мархинская (2,8 %).

Примечательно, что среди гранатов из тр. Ботуобинская программа не идентифицировала разности из высокоалмазоносных дунитов и гарцбургитов (ВАДГ-парагенезис), которые присутствуют в тр. Нюрбинская (0,7 %) и в дайке Мархинская (0,1 %). Хотя и в этих телах содержание гранатов данного высокоалмазонос-



Вариации состава гранатов по парагенетическим группам из кимберлитов Накынского поля

Variations of garnet composition by paragenetic groups from Nakyn field kimberlites

| Парагенезис | Содержание в мас. %, минимальное – максимальное | | | | | | | | | | |
|-------------|---|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|-------------|-------------|-------------------|--------------------|--|--|
| | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Cr ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | FeO _{tot} | | |
| ВАДГ | 40,62–41,87 | 0,0–0,31 | 13,15–16,23 | 9,73–13,0 | 0,37–0,52 | 20,4–22,44 | 2,26–4,96 | 0,0–0,21 | 6,23–7,6 | | |
| ВАМЖЭ | 38,72–40,18 | 0,06–0,61 | 20,25–22,9 | 0,0–0,13 | 0,26–0,51 | 7,27–10,52 | 8,41–13,26 | 0,0–0,20 | 17,42–22,74 | | |
| АП | 39,86–42,51 | 0,0–0,57 | 15,66–18,95 | 5,82–10,2 | 0,3–0,59 | 20,53–25,5 | 0,63–4,84 | 0,0–0,26 | 6,01–8,22 | | |
| АЛА | 38,95–42,29 | 0,0–0,93 | 11,56–16,73 | 8,78–14,76 | 0,27–0,7 | 15,59–21,16 | 3,61–10,0 | 0,0–0,22 | 6,23–8,33 | | |
| АИВ | 40,62–41,47 | 0,12–0,37 | 20,3–20,94 | 1,59–3,45 | 0,34–0,65 | 16,23–18,38 | 4,83–5,77 | 0,0–0,05 | 10,96–13,56 | | |
| АВ | 39,39–41,89 | 0,0–0,59 | 20,95–22,9 | 0,0–0,41 | 0,23–0,48 | 14,37–17,06 | 1,56–7,34 | 0,0–0,2 | 14,19–21,73 | | |
| АМЖП | 38,02–42,19 | 0,0–0,71 | 20,5–23,45 | 0,0–0,34 | 0,2–0,63 | 11,48–15,06 | 1,62–7,12 | 0,0–0,38 | 15,91–23,46 | | |
| АМКГЭ | 40,97–41,67 | 0,24–0,54 | 22,47–22,61 | 0,2–0,84 | 0,2–0,24 | 16,01–17,28 | 8,32–8,96 | 0,05–0,12 | 8,09–9,84 | | |
| ПАЛВ | 38,96–43,4 | 0,0–0,94 | 15,05–19,17 | 5,31–10,66 | 0,25–0,75 | 16,64–21,49 | 3,47–9,01 | 0,0–0,27 | 6,24–8,86 | | |
| ПАЛС | 40,14–44,24 | 0,0–0,82 | 17,41–22,35 | 3,72–7,20 | 0,24–0,64 | 18,18–23,15 | 2,51–8,58 | 0,0–0,37 | 6,14–8,78 | | |
| ПАЛН | 40,68–43,32 | 0,0–0,74 | 18,10–22,36 | 1,58–6,82 | 0,23–0,66 | 19,68–25,42 | 0,78–5,61 | 0,0–0,26 | 5,95–8,92 | | |
| ПАВ | 40,50–40,87 | 0,08–0,23 | 16,21–17,69 | 6,21–8,45 | 0,33–0,39 | 15,03–16,46 | 9,9–11,92 | 0,03–0,04 | 6,22–6,81 | | |
| ПАИРЭ | 37,55–41,21 | 0,0–0,85 | 19,74–22,72 | 0,0–0,20 | 0,19–0,69 | 7,1–12,76 | 2,48–9,03 | 0,0–0,23 | 16,37–25,01 | | |
| ПАМЖЭ | 39,6–42,43 | 0,04–0,62 | 21,81–23,55 | 0,0–0,25 | 0,16–0,42 | 14,15–17,91 | 2,69–7,23 | 0,0–0,21 | 11,8–15,46 | | |
| ПАГЭ | 39,4–41,28 | 0,11–0,16 | 21,24–22,62 | 0,0–0,25 | 0,06–0,27 | 6,43–12,34 | 13,42–17,85 | 0,07–0,19 | 8,64–11,99 | | |
| ПАМЭ | 40,3–44,45 | 0,03–0,75 | 21,52–24,56 | 0,0–2,09 | 0,16–0,55 | 18,61–22,99 | 2,37–5,87 | 0,0–0,26 | 6,42–10,96 | | |
| САЛВ | 39,72–44,27 | 0,0–1,03 | 13,33–16,75 | 5,65–10,0 | 0,24–0,74 | 16,97–20,66 | 4,88–8,12 | 0,0–0,22 | 6,78–8,78 | | |
| САЛН | 40,37–44,24 | 0,0–1,12 | 16,67–23,54 | 0,09–4,04 | 0,21–0,61 | 18,65–23,1 | 3,1–5,29 | 0,0–0,25 | 7,49–10,65 | | |
| САМЭ | 40,1–43,56 | 0,0–0,78 | 18,02–21,7 | 2,5–6,7 | 0,18–0,76 | 17,33–21,11 | 3,7–8,16 | 0,0–0,33 | 5,64–9,57 | | |
| САМЖЭ | 39,6–42,04 | 0,02–0,63 | 19,68–23,57 | 0,0–0,3 | 0,27–0,49 | 13,58–14,86 | 4,01–6,02 | 0,0–0,25 | 15,57–18,72 | | |
| НЛВ | 40,47–43,7 | 0,0–0,79 | 19,84–24,11 | 0,17–4,25 | 0,15–0,7 | 17,18–21,59 | 3,28–7,97 | 0,0–0,37 | 7,16–10,61 | | |
| НИВ | 39,73–42,75 | 0,16–0,5 | 20,51–22,65 | 0,13–1,31 | 0,17–0,36 | 16,36–18,25 | 6,46–8,89 | 0,02–0,13 | 7,93–12,13 | | |
| НМА | 41,85–44,91 | 0,01–0,87 | 18,18–22,93 | 1,63–3,23 | 0,24–0,43 | 22,73–26,58 | 0,07–2,17 | 0,0–0,39 | 5,18–7,6 | | |
| НМКА | 42,06–43,45 | 0,0–0,28 | 21,5–23,33 | 0,07–1,65 | 0,08–0,35 | 15,0–18,28 | 8,33–13,35 | 0,0–0,04 | 4,81–8,09 | | |
| НМЖП | 38,85–40,86 | 0,0–0,99 | 20,72–22,8 | 0,06–0,53 | 0,23–0,46 | 13,33–14,77 | 1,4–5,91 | 0,0–0,15 | 15,76–21,7 | | |
| НРЭ | 37,04–39,44 | 0,0–0,11 | 20,31–21,76 | 0,0–0,14 | 0,4–0,7 | 6,24–8,54 | 3,31–8,41 | 0,0–0,13 | 23,82–29,73 | | |
| НИРЭ | 38,98–41,44 | 0,05–0,71 | 21,03–23,3 | 0,0–0,14 | 0,22–0,38 | 10,31–14,38 | 7,31–11,71 | 0,0–0,22 | 13,55–17,48 | | |
| НГИП | 40,32–42,46 | 0,0–0,94 | 20,51–23,71 | 0,03–2,56 | 0,16–0,61 | 17,52–19,66 | 2,4–6,06 | 0,0–0,22 | 9,73–13,53 | | |
| НОП | 40,66–41,95 | 0,1–0,97 | 17,43–21,34 | 1,49–5,49 | 0,2–0,7 | 17,12–19,05 | 4,3–8,35 | 0,0–0,21 | 7,27–10,28 | | |
| НВЗГХ | 39,64 | 0,16 | 11,57 | 14,68 | 0,71 | 14,97 | 10,32 | 0,03 | 7,21 | | |
| НВЗГИ | 39,52 | 0,15 | 19,32 | 4,28 | 0,69 | 13,01 | 10,86 | 0,00 | 10,92 | | |
| НВГИС | 40,31 | 0,13 | 20,83 | 2,52 | 0,65 | 15,23 | 7,66 | 0,00 | 12,15 | | |

ного парагенезиса весьма невысокое, что также является отличительной особенностью кимберлитов Накынского поля. В кимберлитах дайки Мархинская содержание гранатов из высокоалмазоносных эклогитов (ВАМЖЭ-парагенезис) даже превышает содержание разностей ВАДГ-парагенезиса (см. рис. 2).

Общее содержание гранатов высокоалмазоносных и алмазоносных парагенезисов для всех изученных кимберлитовых тел Накынского поля достаточно высокое и составляет 16,3 % для тр. Нюрбинская, 15,0 % для тр. Ботубинская и 27,9 % для дайки Мархинская, что характерно для кимберлитовых тел с повышенной алмазоносностью. Суммарное содержание гранатов высокоалмазоносных, алмазоносных и потенциально алмазоносных парагенезисов также высокое и во всех телах превышает 50 % (72,3, 53,9 и 77,5 % соответственно).

Стоит также отметить, что для гранатов из кимберлитов Накынского поля характерно достаточно высокое суммарное содержание разностей эклогитовых парагенезисов. Так, если в тр. Нюрбинская суммарное содержание гранатов эклогитовых парагенезисов (как алмазоносных, так и неалмазоносных) составляет по данным проведённой классификации с использованием программы MineralogicalAnalyse 13,7 %, то в тр. Ботубинская – уже 33,2 %, а в дайке Мархинская – 34,3 % (см. рис. 2). Среди гранатов эклогитовых парагенезисов наибольшим распространением пользуются разности из слабоалмазоносных магнезиальных эклогитов (тр. Ботубинская – 14,7 %), потенциально алмазоносных ильменит-рутиловых эклогитов (дайка Мархинская – 22,6 %, тр. Ботубинская – 3,6 %), потенциально алмазоносных магнезиальных (ПАМЭ-парагенезис) и магнезиально-железистых (ПАМЖЭ-парагенезис) эклогитов (тр. Ботубинская – 6,7 % и 5,6 %, соответственно). Кроме этого, отмечены высокожелезистые разности (см. табл.) из неалмазоносных рутиловых (НРЭ-парагенезис) и ильменит-рутиловых (НИРЭ-парагенезис) эклогитов, которые наиболее характерны для кимберлитов из дайки Мархинская (см. рис. 2). Гранаты из потенциально алмазоносных глиноземистых (ПАГЭ-парагенезис) и слабоалмазоносных магнези-

ально-железистых эклогитов (САМЖЭ-парагенезис) незначительно распространены, и их содержание не превышает 1–2 %.

Важно заметить, что ни в одном из трёх проанализированных кимберлитовых тел программа не идентифицировала гранаты из метаморфических пород фундамента, а также из эклогитоподобных пород. Несмотря на высокое содержание суммарного железа в отдельных гранатах из кимберлитов Накынского поля, его все же недостаточно для разностей из метаморфики. В гранатах из метаморфических пород фундамента содержание железа, как правило, превышает 30 мас. %, достигая 40 и более мас. % FeO [7]. Наиболее же высокожелезистые гранаты из изученных кимберлитовых тел программа MineralogicalAnalyse соотнесла по составу с разностями из неалмазоносных рутиловых эклогитов (23,82–29,73 мас. % FeO), менее железистые соответствуют разностям из неалмазоносных ильменит-рутиловых (13,55–17,48 мас. % FeO) и потенциально алмазоносных ильменит-рутиловых (16,37–25,01 мас. % FeO) эклогитов (см. табл.). Определённую часть высокожелезистых гранатов (15,91–23,46 мас. % FeO) программа идентифицировала как разности из алмазоносных магнезиально-железистых пироксенитов (АМЖП-парагенезис). Высокожелезистые гранаты всех отмеченных выше парагенезисов наиболее характерны для дайки Мархинская, хотя встречаются и в других кимберлитовых телах данного поля. Таким образом, утверждения отдельных исследователей, что для кимберлитов Накынского поля характерно повышенное содержание гранатов из метаморфических и эклогитоподобных пород фундамента, сделанное с учётом их высокой железистости, которая, в свою очередь, связывается с высоким содержанием в телах ксенолитов метаморфических пород [8], не совсем правомерны. Результаты проведённой классификации гранатов с использованием программы MineralogicalAnalyse показали, что ксенолиты метаморфических пород фундамента не оказали сколько-нибудь заметного влияния на парагенетическую ассоциацию гранатов из кимберлитов Накынского поля.

Заключение. Результаты проведённых исследований состава гранатов с использованием программы MineralogicalAnalyse показали, что кимберлитовые тела Накынского поля существенно различаются как набором гранатовых парагенезисов, так и их процентным соотношением. Так, для тр. Нюрбинская наиболее характерны гранаты из потенциально алмазоносных лерцолитов с высокохромистым гранатом, тогда как в тр. Ботубинская преобладают гранаты из слабоалмазоносных магниезиальных эклогитов, а в дайке Мархинская – из потенциально алмазоносных ильменит-рутиловых эклогитов. Данное обстоятельство может существенно помочь идентифицировать шлиховые ореолы в пределах Накынского кимберлитового поля, так как при общей трансформации минеральной ассоциации в процессе ореолообразования набор парагенезисов среди кимберлитовых минералов и их соотношения слабо меняются. Это позволяет проводить сравнительный анализ минералов из шлиховых ореолов и ближайших кимберлитовых тел.

Среди достаточно представительных выборок гранатов из трёх изученных кимберлитовых тел, по проведённой классификации, отсутствуют гранаты, по составу соответствующие разностям из метаморфических пород фундамента. Таким образом, ксенолиты метаморфических пород фундамента не оказали заметного влияния на парагенетическую ассоциацию гранатов из кимберлитов Накынского поля. Наиболее высокожелезистые разности в соответствии с проведённой в MineralogicalAnalyse идентификацией соответствуют разностям из неалмазоносных рутиловых эклогитов, менее железистые – разностям из потенциально алмазоносных ильменит-рутиловых, неалмазоносных ильменит-рутиловых и рутиловых эклогитов.

Общая отличительная особенность гранатов из кимберлитов Накынского поля – повышенное содержание разностей эклогитовых парагенезисов. Особенно это относится к тр. Ботубинская и дайке Мархинская, в которых общее содержание эклогитовых гранатов составляет 33,2 и 34,3 % соответственно. Учиты-

вая высокий процент среди эклогитовых гранатов высокожелезистых разностей ПАИРЭ-парагенезиса, особенно в кимберлитах дайки Мархинская (22,6 %), не исключено, что источником определённой части алмазов, пусть и незначительной, в кимберлитах данного поля могли служить потенциально алмазоносные ильменит-рутиловые эклогиты. Основными же источниками алмазов в изученных кимберлитовых телах Накынского поля по проведённой парагенетической классификации гранатов с использованием программы MineralogicalAnalyse являлись алмазоносные лерцолиты с аномально хромистым гранатом (особенно в тр. Нюрбинская) и алмазоносные магниезиально-железистые пироксениты (преимущественно в тр. Ботубинская и дайке Мархинская). Кроме этого, источниками алмазов в описываемых кимберлитах также служили алмазоносные вебстериты, судя по присутствию гранатов соответствующего парагенезиса во всех телах поля, а также алмазоносные перидотиты и высокоалмазоносные магниезиально-железистые эклогиты. В меньшей мере поставщиками алмазов являлись высокоалмазоносные дуниты и гарцбургиты (тр. Нюрбинская и дайка Мархинская) и, незначительно, алмазоносные ильменитовые верлиты и алмазоносные магниезиальные кальциево-глиноземистые эклогиты (трубки Нюрбинская и Ботубинская).

Таким образом, использование программы MineralogicalAnalyse позволяет судить не только о парагенетической принадлежности гранатов, но и о глубинных источниках алмазов конкретных кимберлитовых тел. Парагенетические особенности составов гранатов из кимберлитов Накынского поля могут быть использованы при алмазопоисковых работах для идентификации шлиховых ореолов.

Огромную благодарность авторы выражают Гриценко Андрею Викторовичу за помощь в создании программы MineralogicalAnalyse и написание алгоритма пересчёта анализов.

The authors express their deep gratitude to Andrey V. Gritsenko for help in creating the «MineralogicalAnalyse» program and writing analysis recalculation algorithm.

Список литературы:

1. Богати́ков О. А., Гара́нин В. К., Коно́нова В. А., Кудрявцева Г. П., Васи́льева Е. Р., Вержак В. В., Веричев Е. М., Парсаданян К. С., Посухова Т. В. Архангельская алмазоносная провинция. – М. : МГУ, 1999. – 524 с.
2. Гара́нин В. К., Кудрявцева Г. П., Марфу́нин А. С., Миха́йличенко О. А. Включения в алмазе и алмазоносные породы. – М. : МГУ, 1991. – 240 с.
3. Доусон Дж. Кимберлиты и ксенолиты в них. – М. : Мир, 1983. – 300 с.
4. Коптиль В. И., Кедрова Т. В., Помазанский Б. С., Богуш И. Н., Ковальчук О. Е., Антипин И. Ив. Сравнительный анализ типоморфных особенностей алмазов из кимберлитовых тел и разновозрастных россыпей Средне-Мархинского алмазоносного района // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях : материалы конференции, посвященной 40-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». – Якутск : ЯНЦ СО РАН, 2008. – С. 177–183.
5. Кротков В. В., Кудрявцева Г. П., Богати́ков Е. П., Валуев Е. П., Вержак В. В., Гара́нин В. К., Заостровцев А. А., Коно́нова В. А., Литинский Ю. В., Пашкевич И. Р., Степанов А. Н., Фортыхин В. С. Новые технологии разведки алмазных месторождений. – М. : ГЕОС, 2001. – 310 с.
6. Митюхин С. И., Специус З. В. Включения в алмазах из кимберлитовой трубки Ботуобинская (Накынское поле, Якутия) // Геология и геофизика. – 2005. – № 12. – С. 1198–1206.
7. Хмельков А. М., Власова Э. А. Парагенезисы гранатов из кимберлитов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2018. – № 4. – С. 9–19.
8. Специус З. В., Серенко В. П. Глубинные ксенолиты из кимберлитов Накынского поля // Геологические аспекты минерально-сырьевой базы акционерной компании «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы, решения. – Мирный, 2003. – С. 192–196.
9. Malkovets V., Zedgenizov D., Griffin W., Dak A., O'Reilly S., Pokhilenko N., Mityukhin S. Diamondiferous microxenoliths and xenocrysts from the Nyurbinskaya kimberlite pipe, Yakutia // 9th International Kimberlite Conference Extended Abstract No 91KC-A-00224. – 2008.
10. O'Brien H. E., Birnie A. C., Spencer R. G. Diamondiferous megacrystal garnet and orthopyroxene from Lihobong, Lesotho // 10th International Kimberlite Conference Extended Abstract No 10IKC-229. – 2012.
11. Smith C. B., Bulanova G. P., Walter M. J., Kohn S. C., Mikhail S., Gobbo L. Origin of diamonds from the Dachine ultramafic, French Guyana // 10th International Kimberlite Conference Extended Abstract No 10IKC-97. – 2012.
12. Spetsius Z. V., Taylor L. A., Valley J. W., DeAngelis M. T., Spicuzza M., Ivanov A. S., Banzeruk V. I. Diamondiferous xenoliths from crustal subduction: garnet oxygen isotopes from the Nyurbinskaya pipe, Yakutia // European Journal of Mineralogy. – 2008. – № 20. – P. 375–385.

References:

1. Bogatnikov O. A., Garanin V. K., Kononova V. A., Kudryavtseva G. P., Vasil'eva E. R., Verzhak V. V., Verichev E. M., Parsadanyan K. S., Posukhova T. V. Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya [Arkhangel'sk diamondiferous province], Moscow, MGU Publ., 1999, 524 p.
2. Garanin V. K., Kudryavtseva G. P., Marfunin A. S., Mikhailichenko O. A. Vklucheniya v almaze i almazonosnye porody [Inclusions in diamond and diamond-bearing rocks], Moscow, MGU Publ., 1991, 240 p.
3. Douson Dzh. Kimberlity i ksenolity v nikh [Kimberlites and their xenoliths], Moscow, Mir Publ., 1983, 300 p.
4. Koptil' V. I., Kedrova T. V., Pomazanskii B. S., Bogush I. N., Koval'chuk O. E., Antipin I. Iv. Sravnitel'nyi analiz tipomorfnykh osobennostei almazov iz kimberlitovykh tel i raznovozrastnykh rossypei Sredne-Markhinskogo almazonosnogo raiona [Comparative analysis of typomorphic features of diamonds from kimberlite bodies and placers of different age in the Sredne-Markhinsky diamondiferous region], *Problemy prognozirovaniya i poiskov mestorozhdenii almazov na zakrytykh territoriyakh: materialy konferentsii, posvyashchennoi 40-letiyu YaNIGP TsNIGRI AK "ALROSA"* [Problems of forecasting and prospecting for diamond deposits in closed areas: materials of the conference dedicated to the 40th anniversary of



- YANIGP TsNIGRI of AK "ALROSA", Yakutsk, YaNTs SO RANPubl., 2008, pp. 177–183. (In Russ.).
5. Krotkov V. V., Kudryavtseva G. P., Bogatkov E. P., Valuev E. P., Verzhak V. V., Garanin V. K., Zaostrov-tsev A. A., Kononova V. A., Litinskii Yu. V., Pashke-vich I. R., Stepanov A. N., Fortygin V. S. Novye tekhnologii razvedkialmaznykh mestorozhdenii [New technologies for exploration of diamond deposits], Moscow, GEOS Publ., 2001, 310 p.
 6. Mityukhin S. I., Spetsius Z. V. Vklucheniya v almazakh iz kimberlitovoi trubki Botuobinskaya (Nakynnskoe pole, Yakutiya) [Inclusions in diamonds from Botuobinskaya kimberlite pipe (Nakynskoe field, Yakutia)], *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, No 12, 2005, pp. 1198–1206. (In Russ.).
 7. Khmelkov A. M., Vlasova E. A. Paragenezisy granatov iz kimberlitov [Garnet paragenesis from kimberlites], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya [Proceedings of Voronezh State University, Series: Geology]*, 2018, No 4, pp. 9–19. (In Russ.).
 8. Spetsius Z. V., Serenko V. P. Glubinnye ksenolity iz kimberlitov Nakynskogo polya [Deep xenoliths from kimberlites of Nakyn field], *Geologicheskie aspekty mineral'no-syr'evoi bazy aktsioneranoi kompanii "ALROSA": sovremennoe sostoyanie, perspektivy, resheniya [Geological aspects of mineral resource base of the joint-stock company "ALROSA": current state, prospects, solutions]*, Mirnyi, 2003, pp. 192–196. (In Russ.).
 9. Malkovets V., Zedgenizov D., Griffin W., Dak A., O'Reilly S., Pokhilenko N., Mityukhin S. Diamondiferous microxenoliths and xenocrysts from the Nyurbinskaya kimberlite pipe, Yakutia, *9th International Kimberlite Conference Extended Abstract*, No 91KC-A-00224, 2008.
 10. O'Brien H. E., Birnie A. C., Spencer R. G. Diamondiferous megacrystal garnet and orthopyroxene from Liqhobong, Lesotho, *10th International Kimberlite Conference Extended Abstract*, No 10IKC-229, 2012.
 11. Smith C. B., Bulanova G. P., Walter M. J., Kohn S. C., Mikhail S., Gobbo L. Origin of diamonds from the Dachine ultramafic, French Guyana, *10th International Kimberlite Conference Extended Abstract*, No 10IKC-97, 2012.
 12. Spetsius Z. V., Taylor L. A., Valley J. W., DeAngelis M. T., Spicuzza M., Ivanov A. S., Banzeruk V. I. Diamondiferous xenoliths from crustal subduction: garnet oxygen isotopes from the Nyurbinskaya pipe, Yakutia, *European Journal of Mineralogy*, 2008, No 20, pp. 375–385.

Авторы

Хмельков Александр Михайлович

кандидат геолого-минералогических наук
st_56@mail.ru

Власова Эльвира Александровна

геолог I категории¹
KulaninaEA@alrosa.ru

Иванов Александр Сергеевич

кандидат геолого-минералогических наук
ведущий научный сотрудник²
asivan@mail.ru

¹ Вилюйская геологоразведочная экспедиция
АК «АЛРОСА» ПАО, Якутия

² Санкт-Петербургский горный университет

Authors

Khmelkov Alexander Mikhaylovich

PhD
st_56@mail.ru

Vlasova Elvira Alexandrovna

geologist I category¹
KulaninaEA@alrosa.ru

Ivanov Alexander Sergeevich

PhD
leading resercher²
asivan@mail.ru

¹ JSC ALROSA (PJSC),
Yakutia, Russia

² Saint Peterburg Mining University, Russia