

ПАРАГЕНЕЗИСЫ ПИКРОИЛЬМЕНИТОВ ИЗ КИМБЕРЛИТОВ

Э. А. Власова, А. М. Хмельков

*АК «АЛРОСА» (ПАО), Вилюйская геологоразведочная экспедиция,
Республика Саха (Якутия), п. Айхал*

Поступила в редакцию 4 марта 2019 г.

Аннотация: *приведены парагенезисы пикроильменитов из кимберлитов, выделяемые с помощью оригинальной программы «MineralogicalAnalyse». Использование данной программы позволяет надежно и качественно определять парагенетическую принадлежность минералов из кимберлитов и родственных им пород. Программа «MineralogicalAnalyse» на данный момент способна распознавать среди составов пикроильменитов 24 парагенезиса. Среди определяемых парагенезисов кроме типичных пикроильменитов присутствуют низкомагnezиальные высокотитанистые ильмениты, в том числе генетически не связанные непосредственно с кимберлитами, но имеющие широкое распространение в ореолах рассеяния. Детально описаны выделяемые программой парагенезисы пикроильменитов (ильменитов), их взаимоотношения и особенности химизма. Приведенный набор парагенезисов на сегодня наиболее полно характеризует парагенетическое разнообразие пикроильменитов из кимберлитов и связанных с ними россыпей. Использование данных парагенезисов позволяет судить о глубинных источниках данного минерала в кимберлитах.*

Ключевые слова: *минералы-индикаторы кимберлита, парагенезис, алмазоносный, пикроильмениты, кимберлиты.*

PICROILMENITE PARAGENESIS FROM KIMBERLITES

Abstract: *the picroilmenite paragenesis from kimberlites are given with use of the original program «MineralogicalAnalyse». Using of the program allows reliably and qualitatively to define the paragenetic accessory of minerals from kimberlites and kimberlite-like rocks. The program «MineralogicalAnalyse» is capable to recognize 24 paragenesis among picroilmenite compositions now. Among the designated paragenesis not only typical picroilmenites, but also low-magnesium high-titanium ilmenites, including genetically not directly related to kimberlites, but wide distribution in haloes. Allocated by the program picroilmenite (ilmenite) paragenesis, their interrelations and particularities of chemism were thoroughly described. Given a set of paragenesis most fully characterize paragenetic diversity of picroilmenites from kimberlites and associated placers at present. The proposed set of paragenesis allows to speculate about the deep sources of this mineral in kimberlites.*

Key words: *kimberlite tracer minerals, paragenesis, diamondiferous, picroilmenites, kimberlites.*

Введение

Определение парагенезиса минералов-индикаторов кимберлитов (МИК) имеет важное значение при алмазопроисловых работах, так как позволяет не только установить генезис источников кимберлитовых минералов, но выполняя сравнение парагенетических особенностей МИК поисковых объектов, можно более надежно проводить их прогнозную оценку. За последнее время накоплен огромный фактический материал по химическому составу минералов из глубинных ксенолитов кимберлитов, в том числе по составу пикроильменитов. Для определения парагенезиса МИК применяются различные приемы и методы [1–6], однако, ни один из них на сегодня не является универсальным. Большинство существующих мето-

дик не используются производителями из-за их трудоемкости, отсутствия необходимого аналитического оборудования или сложного алгоритма пересчета.

Фактический материал и методика обработки

Для пересчета химических составов пикроильменитов на парагенезисы использовалась оригинальная программа «MineralogicalAnalyse». Принцип работы данной программы подробно рассмотрен в ранее опубликованных материалах [7–9]. Здесь лишь отметим, что алгоритм отнесения составов программой к определенному парагенезису основан на использовании чисто химических составов минералов. Программой учитывается процентное содержание каждого оксида (в мас.%) по данным полного микрозондового

анализа и путем сопоставления с эталонными составами осуществляется определение парагенетической принадлежности конкретного состава с привлечением статистических методов.

Основу эталонной базы программы «Mineralogical-Analyse» по пикроильменитам составили химсоставы из химико-генетической классификации МИК, разработанной сотрудниками МГУ им. М. В. Ломоносова [5, 6, 10, 11], которая была существенно дополнена составами из опубликованных источников [12, 13] и собственных данных, полученных в процессе работ. Так, в эталонную базу программы были дополнительно внесены составы ильменитов из базальтоидов, а также пикроильмениты из кимберлитоподобных пород [14], имеющих широкое распространение в механических ореолах рассеяния. Без учета вышеназванных составов все попытки использования любой генетической классификации МИК применительно к шлиховым ореолам, с целью парагенетической привязки слагающих их минералов, будут приводить к существенному искажению результатов.

Принадлежность большинства составов минералов из глубинных ксенолитов эталонной базы программы «MineralogicalAnalyse» определена петрографически, другая часть составов, и это касается в основном алмазоносных парагенезисов, в том числе из включений в алмазах, выделена в самостоятельные парагенезисы по составу минералов. Все вносимые в эталонную базу программы составы-парагенезисы, в том числе по пикроильменитам, подвергались детальному кластерному анализу с целью подтверждения их парагенезиса. Затем с помощью статистических методов оценивалось поведение этих новых составов между собой внутри отдельного конкретного парагенезиса и среди всего набора парагенезисов.

Среди составов пикроильменитов программа «MineralogicalAnalyse» на сегодня способна выделить 24 парагенезиса.

Парагенетические особенности пикроильменитов

В табл. 1 приведены средние составы пикроильменитов (ильменитов) по выделенным парагенезисам и расшифровка их аббревиатур, которые автоматически прописываются программой «MineralogicalAnalyse» каждому составу. Положение фигуративных точек средних составов данных парагенезисов на диаграммах TiO_2 -MgO и Cr_2O_3 -MgO показаны на рис. 1. Результаты кластерного анализа в виде дендрограммы соотношения различных парагенетических групп пикроильменитов приведены на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что пикроильмениты из высокоалмазоносных перидотитов, встречающиеся в виде включений в алмазах (ВАУ), обладают индивидуальным составом, о чем свидетельствует их обособленное расположение на дендрограмме, на значительном удалении по уровню связывания от остальных парагенезисов. Для пикроильменитов данного парагенезиса характерна повышенная магнезиальность (в сред-

нем 11,88 мас. % MgO) при аномально высокой титанности (55,52 мас.% TiO_2) и пониженном содержании трехвалентного железа (2,74 мас. % Fe_2O_3), как и в целом суммарного железа [6] (табл. 1). Примечательно то, что пикроильмениты ВАУ-парагенезиса обладают невысокой хромистостью (в среднем всего 0,45 мас. % Cr_2O_3). На диаграмме TiO_2 -MgO (рис. 1) точка состава данного парагенезисов располагается в правой верхней части графика, в высокотитанистой и высокомагнезиальной области на границе пунктирной кривой, разделяющей поля типичных кимберлитовых и некимберлитовых разностей [14]. На развертке Cr_2O_3 -MgO точка среднего состава пикроильменитов ВАУ-парагенезиса расположилась в левом верхнем углу в высокомагнезиальной области, обособленно от остальных парагенезисов (рис. 1). Следует отметить, что данный парагенезис среди пикроильменитов встречается крайне редко, причем не только в шлиховых ореолах, но даже в алмазоносных кимберлитах. Так, среди пикроильменитов промышленно алмазоносной трубки Юбилейная Алакит-Мархинского кимберлитового поля Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) содержание разностей ВАУ-парагенезиса составляет всего 2,3 %. Поэтому само присутствие данного парагенезиса среди пикроильменитов в современных или древних ореолах рассеяния, является положительным моментом, свидетельствующим в пользу потенциальной алмазоносности их первоисточника.

Из рис. 2 также хорошо видно, что пять парагенезисов (САП, НГИОП, НИП, НГИП и НГ) объединились в достаточно компактную кластерную группу на относительно низком уровне связывания. Наиболее близким составом из данной группы обладают пикроильмениты из слабоалмазоносных перидотитов (САП), в том числе гранат-ильменитовых, и разности из неалмазоносных гранат-ильменитовых ортопироксенитов и пироксенитов с высокохромистым высокомагнезиальным пикроильменитом (НГИОП) (рис. 2). Оба данных парагенезиса представлены высокомагнезиальными высокотитанистыми разностями с повышенным содержанием хрома, составляющим в среднем 1,67 мас. % Cr_2O_3 для пикроильменитов из слабоалмазоносных перидотитов (САП) [6] и 1,17 мас. % Cr_2O_3 для пикроильменитов НГИОП-парагенезиса (табл. 1). В то же время пикроильмениты из неалмазоносных гранат-ильменитовых ортопироксенитов и пироксенитов (НГИОП), в отличие от САП-парагенезиса, имеют более высокие содержания глинозема (0,72 мас. % против 0,45 мас. % Al_2O_3) и совершенно не содержат марганца (табл. 1). Пикроильмениты САП-парагенезиса встречаются как в виде включений в алмазах, так и в неалмазоносных перидотитах [6]. Следует также добавить, что пикроильмениты данного парагенезиса пользуются широким распространением как в кимберлитовых телах, особенно алмазоносных, так и в ореолах рассеяния (до 70–80 %). Отмечено, что в алмазоносных кимберлитах, при условии доминирования среди пикроильменитов парамагнитных разностей, резко преобладают над остальными парагенезисами

Таблица 1

Средние составы пикроильменитов (ильменитов) по парагенетическим группам

| № п/п | Парагенезис | Cr ₂ O ₃ | TiO ₂ | MgO | Al ₂ O ₃ | MnO | FeO | Fe ₂ O ₃ | Расшифровка парагенетической принадлежности пикроильменитов |
|-------|-------------|--------------------------------|------------------|-------|--------------------------------|------|-------|--------------------------------|--|
| 1 | ВАУ | 0,45 | 55,52 | 11,88 | 0,32 | 0,17 | 28,29 | 2,74 | высокоалмазоносные перидотиты (включения в алмазах ультраосновного парагенезиса) |
| 2 | АПЭН | 0,15 | 39,78 | 2,30 | 1,83 | 0,15 | 31,52 | 22,81 | алмазоносные пироксениты и эклогиты с низкохромистым ильменитом, в том числе включения в алмазах |
| 3 | АЭНФ | 0,10 | 37,82 | 5,09 | 0,74 | 0,01 | 24,93 | 30,94 | алмазоносные эклогиты с низкохромистым ферримагнитным пикроильменитом |
| 4 | ПАЛВ | 4,63 | 53,93 | 16,01 | 0,34 | 0,27 | 19,65 | 4,98 | потенциально алмазоносные лерцолиты с высокохромистым пикроильменитом |
| 5 | ПАЭН | 0,10 | 44,67 | 1,68 | 0,12 | 0,08 | 37,10 | 15,08 | потенциально алмазоносные эклогиты с низкохромистым ильменитом |
| 6 | САП | 1,67 | 52,15 | 12,04 | 0,45 | 0,23 | 25,12 | 8,04 | слабоалмазоносные перидотиты |
| 7 | САПВЭН | 0,13 | 53,92 | 4,49 | 0,19 | 0,44 | 39,42 | 0,51 | слабоалмазоносные пироксениты, вебстериты и эклогиты с низкохромистым пикроильменитом |
| 8 | САЭН | 0,03 | 50,66 | 1,35 | 0,08 | 1,11 | 42,03 | 3,85 | слабоалмазоносные эклогиты, реже вебстериты с низкохромистым ильменитом |
| 9 | САЭЭПН | 0,04 | 47,81 | 1,06 | 0,04 | 0,04 | 41,06 | 8,87 | слабоалмазоносные эклогиты и эклогитоподобные породы с низкохромистым ильменитом |
| 10 | НПЭВ | 2,05 | 47,60 | 13,55 | 0,78 | 0,09 | 18,58 | 18,56 | неалмазоносные перидотиты и энстатиты с высокохромистым пикроильменитом |
| 11 | НЛП | 0,29 | 49,02 | 9,39 | 0,59 | 0,13 | 27,22 | 12,92 | неалмазоносные лерцолиты и пироксениты, включая гранат-ильменитовые и флогопит-ильменитовые |
| 12 | НПП | 0,5 | 50,73 | 6,51 | 0,35 | 0,27 | 34,91 | 7,07 | неалмазоносные пироксениты и перидотиты, в том числе ильменитовые и цирконсодержащие |
| 13 | НЭПВГ | 0,27 | 44,01 | 1,34 | 0,07 | 0,13 | 41,95 | 11,74 | неалмазоносные эклогитоподобные породы и включения в гранатах |
| 14 | НПФ | 3,91 | 40,46 | 7,30 | 0,71 | 0,12 | 23,26 | 24,95 | неалмазоносные перидотиты, вебстериты, верлиты преимущественно с высокохромистым ферримагнитным пикроильменитом |
| 15 | НДФ | 1,88 | 44,37 | 6,54 | 0,68 | 0,17 | 28,07 | 19,11 | неалмазоносные диопсидиты, в том числе с высокохромистым ферримагнитным пикроильменитом |
| 16 | НЭСГФ | 2,02 | 35,90 | 4,46 | 0,69 | 0,05 | 24,22 | 33,86 | неалмазоносные эклогиты и сростки с гранатом с высокохромистым ферримагнитным пикроильменитом |
| 17 | НПДПЭ | 0,19 | 49,78 | 4,79 | 0,19 | 0,49 | 35,75 | 10,59 | неалмазоносные породы переходного генезиса (диопсидиты, вебстериты), включая кимберлитоподобные (типа пикритов), реже эклогиты |
| 18 | НИП | 2,63 | 50,30 | 10,12 | 0,61 | 0,35 | 26,85 | 9,44 | неалмазоносные ильменитовые перидотиты с высокохромистым пикроильменитом |
| 19 | НГИП | 0,97 | 50,99 | 9,28 | 0,67 | 0,01 | 29,33 | 8,78 | неалмазоносные гранат-ильменитовые пироксениты |
| 20 | НЦИПФ | 0,31 | 41,83 | 5,80 | 0,23 | 0,38 | 26,90 | 25,51 | неалмазоносные цирконсодержащие ильменитовые пироксениты с низкохромистым ферримагнитным пикроильменитом |
| 21 | НГ | 0,40 | 52,75 | 9,46 | 0,00 | 0,00 | 30,58 | 6,97 | неалмазоносные глиммериты |
| 22 | НГИОП | 1,17 | 52,83 | 13,49 | 0,72 | 0,00 | 23,42 | 8,72 | неалмазоносные гранат-ильменитовые ортопироксениты и пироксениты с высокохромистым высокомагнезиальным пикроильменитом |
| 23 | НРКПН | 0,06 | 41,82 | 1,54 | 0,01 | 0,51 | 34,35 | 19,93 | неалмазоносные родственные кимберлитам породы (типа щелочных базальтоидов) с низкохромистым низкотитанистым ильменитом |
| 24 | ИБ | 0,04 | 49,57 | 1,02 | 0,08 | 0,60 | 42,15 | 7,48 | ильмениты из базальтоидов |

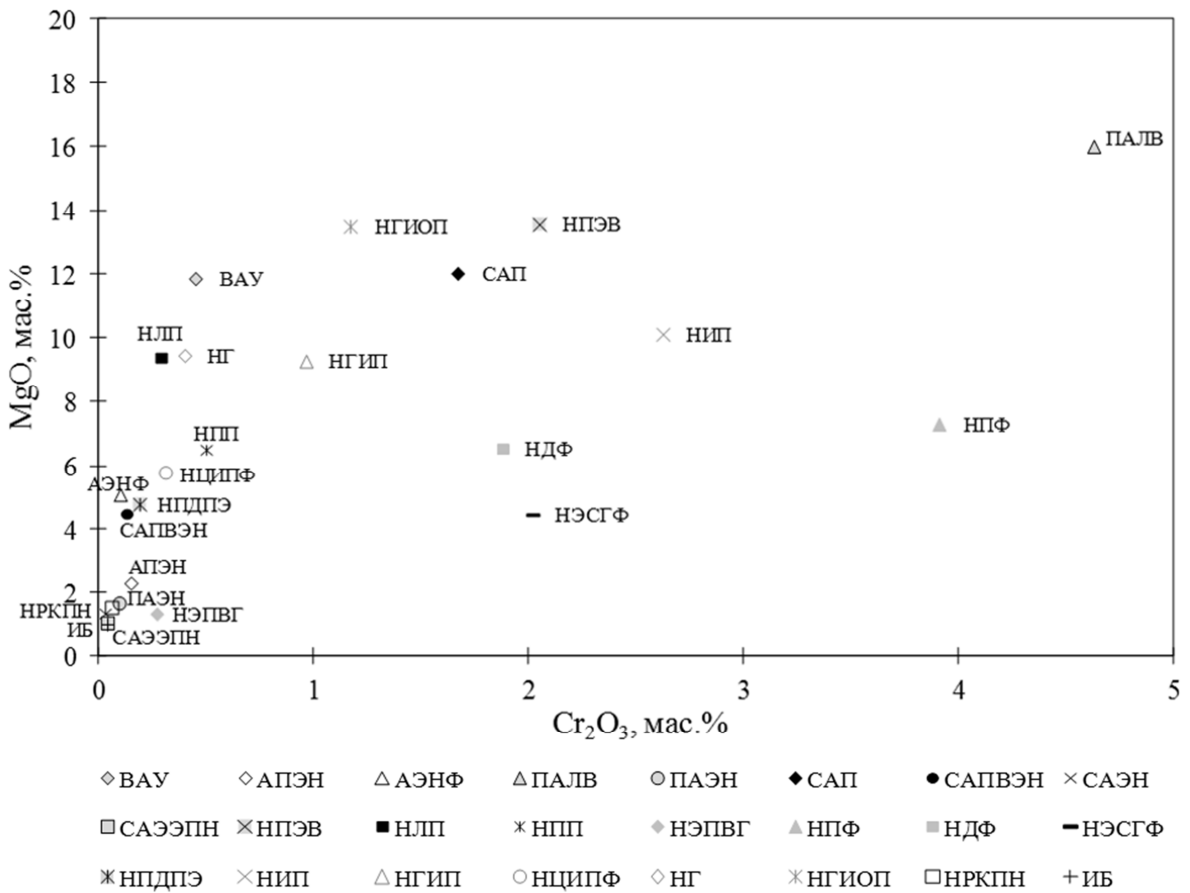
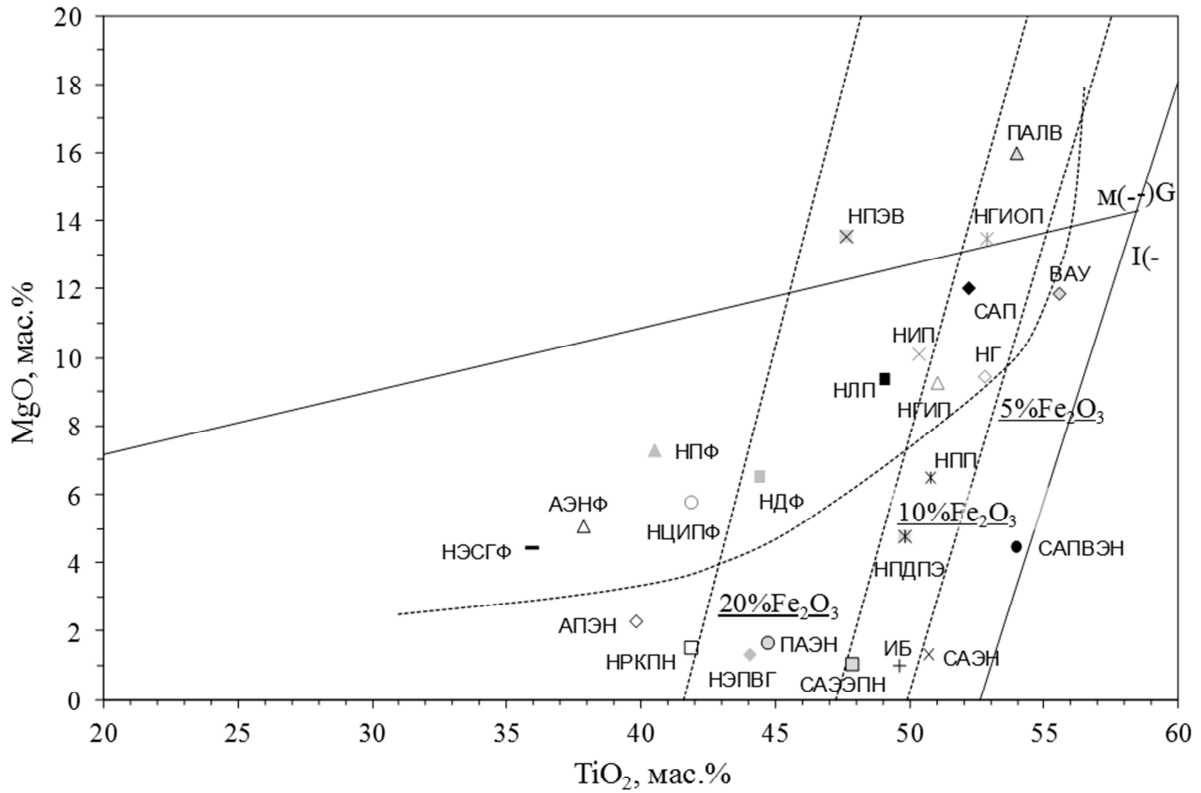


Рис. 1. Положение средних составов парагенетических групп пикроильменитов (ильменитов) на диаграммах TiO_2 - MgO и Cr_2O_3 - MgO . Примечание: на диаграмме TiO_2 - MgO пунктирной кривой показано поле типичных кимберлитовых пикроильменитов [14].

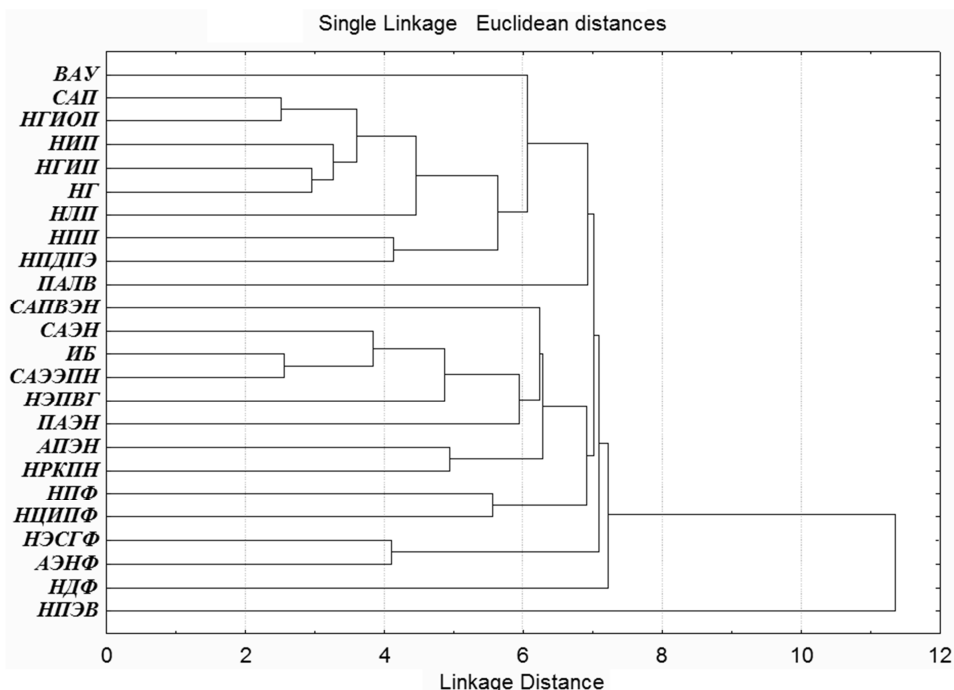


Рис. 2. Результаты кластерного анализа составов пикроильменитов (ильменитов) различных парагенетических групп.

именно разности из слабоалмазоносных перидотитов. Так, в упомянутой выше тр. Юбилейная содержание пикроильменитов САП-парагенезиса составляет 63,1%. Одновременно данный парагенезис может быть широко представлен и в неалмазоносных кимберлитовых телах. Пикроильмениты НГИОП-парагенезиса были установлены сотрудниками объединения «Аэрогеология» в неалмазоносных ксенолитах флогопит-гранат-ильменитовых пироксенитов и ортопироксенитов из трубок Мгришница и Поисковая Бенчимэ-Куйокского кимберлитового поля ЯАП. На диаграмме TiO_2 -MgO точки составов пикроильменитов САП- и НГИОП-парагенезисов располагаются в непосредственной близости друг от друга в высокомагнезиальной области между изоплетами 5% и 10% Fe_2O_3 (рис. 1). На развертке Cr_2O_3 -MgO точки средних составов пикроильменитов данных парагенезисов также расположены в относительной близости друг от друга, в верхней части диаграммы, в высокомагнезиальной и высокохромистой области.

Близким составом в описываемой кластерной группе обладают также пикроильмениты из неалмазоносных гранат-ильменитовых пироксенитов (НГИП) и из неалмазоносных глиммеритов (НГ) (рис. 2). Оба данных парагенезиса представлены умеренномагнезиальными (9,28 и 9,46 мас. % MgO, соответственно), практически не содержащими марганца (0,01 и 0,0 мас. % MnO, соответственно) разностями (табл. 1). При общем сходстве составов этих двух парагенезисов, они все же имеют характерные отличия. Так, пикроильмениты из неалмазоносных глиммеритов обладают более высокой титанистостью (в среднем 52,75 мас. % против 50,99 мас. % TiO_2) и более низкими параметрами по хрому (0,40 мас. % против

0,97 мас. % Cr_2O_3) по сравнению с пикроильменитами НГИОП-парагенезиса. Кроме этого, в разностях НГ-парагенезиса практически полностью отсутствует глинозем, тогда как в пикроильменитах из неалмазоносных гранат-ильменитовых пироксенитов содержание Al_2O_3 составляет 0,67 мас. % (табл. 1). На диаграмме TiO_2 -MgO точки средних составов пикроильменитов НГ- и НГИП-парагенезисов располагаются в непосредственной близости друг от друга в умеренномагнезиальной области между изоплетами 5% и 10% Fe_2O_3 (рис. 1). На развертке Cr_2O_3 -MgO точки составов пикроильменитов данных парагенезисов несколько удалены друг от друга по оси хрома, располагаясь в правой половине диаграммы (рис. 1). Пикроильмениты НГИП-парагенезиса были установлены сотрудниками объединения «Аэрогеология» в неалмазоносных ксенолитах флогопит-гранат-ильменитовых пироксенитов, а разности НГ-парагенезиса – в неалмазоносных ксенолитах ильменитовых глиммеритов из тр. Слюдянка Бенчимэ-Куйокского кимберлитового поля ЯАП. Оба данных состава были внесены в эталонную базу программы «Mineralogical-Analyse» в качестве самостоятельных парагенезисов, характеризующих неалмазоносные источники.

Еще один состав из описываемой кластерной группы (рис. 2) представлен пикроильменитами из неалмазоносных ильменитовых перидотитов с высокохромистым пикроильменитом (НИП). Пикроильмениты НИП-парагенезиса, в отличие от других парагенезисов данной кластерной группы, обладают аномально высокой хромистостью (в среднем 2,63 мас. % Cr_2O_3) при умеренной магнезиальности (10,12 мас. % MgO) и высокой титанистости (50,30 мас. % TiO_2) (табл. 1). На диаграмме TiO_2 -MgO точка состава

пикроильменитов НИП-парагенезиса расположена в умеренномагнезиальной области слева от изоплеты с 10 % Fe_2O_3 , вблизи от состава пикроильменитов НГИП-парагенезиса (рис. 1). На диаграмме Cr_2O_3 – MgO точка состава пикроильменитов данного парагенезиса занимает индивидуальное положение в высокохромистой области средней части графика на значительном удалении от остальных парагенезисов. Пикроильмениты НИП-парагенезиса были установлены сотрудниками объединения «Аэрогеология» в неалмазоносных ксенолитах флогопит-гранат-ильменитовых перидотитов из тр. Ноябрьская Бенчимэ-Куйокского кимберлитового поля ЯАП.

Остальные парагенезисы пикроильменитов не образуют четко выраженных кластерных групп (рис. 2). В то же время, среди парагенезисов, обладающих близкими составами, следует в первую очередь отметить типичные ильмениты из базальтоидов (ИБ) и разности из слабоалмазоносных эклогитов и эклогитоподобных пород с низкохромистым ильменитом (САЭЭПН). Составы данных парагенезисов на кластерной дендрограмме расположены на достаточно низком уровне связывания (рис. 2). Оба данных парагенезиса представлены низкомагнезиальными (в среднем 1,02 и 1,06 мас. % MgO , соответственно), низкохромистыми (по 0,04 мас. % Cr_2O_3) и высокожелезистыми (49,63 и 49,93 мас. % FeO_{tot} , соответственно) ильменитами (табл. 1). Однако типичные ильмениты из базальтоидов, в отличие от ильменитов САЭЭПН-парагенезиса, являются более титанистыми (в среднем 49,57 против 47,81 мас. % TiO) и обладают более высокой концентрацией марганца (0,6 против 0,04 мас. % MnO). На диаграмме TiO_2 – MgO точки средних составов данных парагенезисов расположены в непосредственной близости друг от друга, в правом нижнем углу графика между изоплетами 5 % и 10 % Fe_2O_3 (рис. 1). На диаграмме Cr_2O_3 – MgO точки составов описываемых парагенезисов практически полностью совпали. Несмотря на схожесть составов этих парагенезисов, возникла необходимость в выделении данных составов в отдельные группы и внесения их в эталонную базу программы «MineralogicalAnalyse» в качестве самостоятельных парагенезисов. Дело в том, что единичные составы ильменитов САЭЭПН-парагенезиса были установлены в ксенолитах алмазоносных пород, что и послужило определяющим фактором отнесения данного парагенезиса к слабоалмазоносным. О необходимости учета состава ильменитов из базальтоидов (ИБ), имеющих широкое распространение в ореолах рассеяния, отмечалось выше. Кроме этого, типичные трапповые ильмениты могут иметь место и непосредственно в кимберлитах в качестве ксеногенного корового материала. Поэтому без учета этих низкомагнезиальных ильменитов определение парагенетической принадлежности составов среди данного минерала неизбежно приведет к ошибкам.

Несколько схожий состав с описанными выше парагенезисами имеют низкохромистые ильмениты из слабоалмазоносных эклогитов, реже вебстеритов

(САЭН), хотя и расположены они на более высоком уровне связывания от разностей САЭЭН- и ИБ-парагенезисов (рис. 2). Данный парагенезис (САЭН) также представлен низкомагнезиальными (в среднем 1,35 мас. % MgO), низкохромистыми (0,03 мас. % Cr_2O_3) и высокожелезистыми (45,88 мас. % FeO_{tot}) ильменитами [6]. В то же время ильмениты из слабоалмазоносных эклогитов и вебстеритов являются более титанистыми по сравнению с разностями САЭЭПН- и ИБ-парагенезисов, к тому же содержат значительно меньше трехвалентного железа и, что особенно важно, несравнимо больше обогащены марганцем, превышающим 1 мас. % MnO (табл. 1). На диаграмме TiO_2 – MgO состав ильменитов из слабоалмазоносных эклогитов и вебстеритов расположен в правом нижнем углу диаграммы, в поле составов ильменитов из базальтоидов [14]. На диаграмме Cr_2O_3 – MgO состав ильменитов САЭН-парагенезиса также расположен в непосредственной близости от составов ильменитов из базальтоидов и разностей САЭЭПН-парагенезиса: в низкомагнезиальной низкохромистой области (рис. 1). Отметим, что ильмениты САЭН-парагенезиса в единичных случаях отмечены в виде включений в алмазе и сростков с ним [6].

Среди других схожих по составу парагенезисов следует отметить разности из алмазоносных эклогитов с низкохромистым ферримагнитным пикроильменитом (АЭНФ) и из неалмазоносных эклогитов и сростков с гранатом с высокохромистым ферримагнитным пикроильменитом (НЭСГФ). Хотя на кластерной дендрограмме данные парагенезисы располагаются не на таком низком уровне связывания, как описанные предыдущие составы (рис. 2). Оба данных парагенезиса (АЭНФ и НЭСГФ), кроме того что относятся к ферримагнитным разностям, то есть заведомо являясь низкотитанистыми (в среднем 37,82 и 35,90 мас. % TiO_2 , соответственно) и низкомагнезиальными (5,09 и 4,46 мас. % MgO , соответственно), являются еще и высокожелезистыми разностями (табл. 1) с аномально высоким содержанием трехвалентного железа (30,94 и 33,86 мас. % Fe_2O_3 , соответственно). Однако принципиальным отличием данных парагенезисов является то, что ферримагнитные пикроильмениты из алмазоносных эклогитов являются низкохромистыми, содержащими всего 0,1 мас. % Cr_2O_3 , тогда как ферримагнитные пикроильмениты НЭСГФ-парагенезиса являются высокохромистыми, концентрация хрома в которых достигает 4,4 мас. % Cr_2O_3 , составляя в среднем 2,02 мас. % Cr_2O_3 [6]. На диаграмме TiO_2 – MgO точки средних составов данных парагенезисов расположены в непосредственной близости друг от друга в левой части графика, в низкотитанистой низкомагнезиальной области в конце «ферримагнитного хвоста» (рис. 1). В то же время на диаграмме Cr_2O_3 – MgO точки составов описываемых парагенезисов значительно разобщены и удалены друг от друга вдоль оси хрома в связи с различной концентрацией данного оксида.

Некоторые черты сходства составов наблюдаются

также у таких парагенезисов, как пикроильмениты из неалмазоносных пироксенитов (диопсидитов) и перидотитов, в том числе ильменитовых и цирконсодержащих (НПП), и разностей из неалмазоносных кимберлитоподобных пород (типа пикритов) и пород переходного генезиса (диопсидитов, вебстеритов), реже эклогитов (НПДПЭ). Оба данных парагенезиса на кластерной дендограмме расположены в парной связи, хотя и на достаточно высоком уровне связывания (рис. 2). По составу пикроильмениты этих парагенезисов являются низкохромистыми и низкомагнезиальными. Однако пикроильмениты из неалмазоносных пироксенитов и перидотитов (НПП) являются более хромистыми (в среднем 0,5 мас. % Cr_2O_3) и магнезиальными (6,51 мас. % MgO) [6] по сравнению с разностями переходного НПДПЭ-парагенезиса (0,19 и 4,79 мас. %, соответственно) (табл. 1). Имеются отличия и по другим оксидам, хотя и менее значительные. На диаграмме TiO_2 - MgO точки средних составов данных парагенезисов расположены в относительной близости друг от друга в низкомагнезиальной области между изоплетами 5 % и 10 % Fe_2O_3 (рис. 1). Примечательно то, что точки составов обоих парагенезисов расположены справа от пунктирной кривой, ограничивающей поле типичных кимберлитовых пикроильменитов. Более того, они попадают в так называемый пикритовый тренд вдоль по линии гейкилит-ильменит с изоморфным замещением изовалентного характера по схеме $\text{Mg}^{2+} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$ [14]. На диаграмме Cr_2O_3 - MgO точки составов описываемых парагенезисов несколько разобщены, при этом оба они расположены в низкомагнезиальной низкохромистой области (рис. 1). Пикроильмениты НПП-парагенезиса, помимо типичных перидотитов и пироксенитов [6], установлены в ксенолитах неалмазоносных цирконсодержащих ильменитовых пироксенитов из некоторых кимберлитовых трубок мезозойского возраста в пределах Бенчмэ-Куойкского поля ЯАП, а также в неалмазоносном ксенолите апатитсодержащего рутилового эклогита из тр. Мгришница этого же поля. Пикроильмениты НПДПЭ-парагенезиса присутствуют во многих телах мезозойского возраста Прианабарья севера ЯАП, породы которых отнесены к кимберлитоподобным [15], в том числе в пределах Ары-Мастахского, Дюкенского и Бирингиндинского кимберлитовых полей [14]. Имеются также данные, свидетельствующие в пользу того, что источниками подобных пикроильменитов с промежуточным составом могут являться глубинные ксенолиты переходного генезиса – пироксениты (диопсидиты), вебстериты, реже эклогиты [5, 6].

Еще одна пара парагенезисов, образующая на кластерной дендограмме парную корреляционную связь на более высоком уровне связывания, чем описанные предыдущие парагенезисы, представлена разностями из алмазоносных пироксенитов и эклогитов с низкохромистым ильменитом (АПЭН) и низкохромистыми низкотитанистыми ильменитами из неалмазоносных родственными кимберлитам пород (НРКПН) типа щелочных базальтоидов (рис. 2). Оба парагенезиса

представлены высокожелезистыми, низкомагнезиальными и низкотитанистыми ильменитами с невысоким содержанием хрома и повышенным количеством окисного железа, достигающим 20 и более мас. % Fe_2O_3 (табл. 1). Однако алмазоносный парагенезис (АПЭН), в отличие от ильменитов из родственных кимберлитам пород, является более хромистым (в среднем 0,15 мас. % против 0,06 мас. % Cr_2O_3) и менее титанистым (39,78 мас. % против 41,82 мас. % TiO_2). Но наиболее важным отличием данных парагенезисов является то, что ильмениты из алмазоносных пироксенитов и эклогитов, в отличие от неалмазоносного НРКПН-парагенезиса, содержат аномально высокое количество глинозема (в среднем 1,83 мас. % против 0,01 мас. % Al_2O_3) при значительно меньшей концентрации марганца (0,15 мас. % против 0,51 мас. % MnO) (табл. 1). Ильмениты НРКПН-парагенезиса присутствуют во многих телах Прианабарья севера ЯАП, которые отнесены к родственными кимберлитам породам. В частности они характерны для щелочных базальтоидов Ары-Мастахского кимберлитового поля (Ан.70/63 и др.) [14]. На диаграмме TiO_2 - MgO точки средних составов описываемых парагенезисов расположены в низкомагнезиальной области, в нижней части графика слева от изоплеты 10 % Fe_2O_3 (рис. 1). Фигуративные точки составов данных парагенезисов также находятся за пределами поля типичных кимберлитовых пикроильменитов, справа от пунктирной кривой, только в более низкотитанистой области. На графике Cr_2O_3 - MgO составы ильменитов АПЭН- и НРКПН-парагенезисов расположились в непосредственной близости друг от друга в левой нижней части диаграммы. Следует отметить, что разности АПЭН-парагенезиса встречены не только в алмазоносных ксенолитах, но и в качестве включений в алмазах и сростков с ними. При этом низкомагнезиальные ильмениты данного алмазоносного АПЭН-парагенезиса встречаются достаточно редко, в отличие от неалмазоносных парагенезисов, расположенных в этой же области.

Еще на более высоком уровне связывания (рис. 2) расположены разности из неалмазоносных перидотитов, вебстеритов, верлитов преимущественно с высокохромистым ферримагнитным пикроильменитом (НПФ) и парагенезис, представленный низкохромистыми ферримагнитными пикроильменитами из неалмазоносных цирконсодержащих ильменитовых пироксенитов (НЦИПФ). Оба данных неалмазоносных парагенезиса представлены низкомагнезиальными и низкотитанистыми, преимущественно ферримагнитными, пикроильменитами с повышенным содержанием трехвалентного железа, превышающим 20 мас. % Fe_2O_3 (табл. 1). Несмотря на это, составы данных парагенезисов все же существенно различаются. Отличия в первую очередь касаются того, что пикроильмениты НПФ-парагенезиса обладают аномальной хромистостью, в которых содержание оксида хрома достигает 10,4 мас. %, составляя в среднем 3,91 мас. % Cr_2O_3 [6]. В пикроильменитах из неалмазонос-

ных цирконсодержащих ильменитовых пироксенитов количество хрома значительно скромнее и составляет в среднем всего 0,31 мас. % Cr_2O_3 . Кроме этого, пикроильмениты НЦИПФ-парагенезиса по сравнению с ферримагнитными разностями из неалмазоносных перидотитов (НПФ) являются менее магниальными (в среднем 5,8 мас. % против 7,3 мас. % MgO) и менее глиноземистыми (0,23 мас. % против 0,71 мас. % Al_2O_3) с более высокой концентрацией марганца (0,38 мас. % против 0,12 мас. % MnO) (табл. 1). На диаграмме TiO_2 – MgO точки средних составов описываемых парагенезисов расположены в относительной близости друг от друга в поле типичных кимберлитовых пикроильменитов, в левой половине графика слева от изоплеты 10 % Fe_2O_3 (рис. 1). На диаграмме Cr_2O_3 – MgO точки составов данных парагенезисов значительно удалены друг от друга вдоль оси хрома в связи с различной концентрацией этого оксида, располагаясь на разных флангах графика. Добавим, что пикроильмениты НЦИПФ-парагенезиса были установлены сотрудниками объединения «Аэрогеология» в неалмазоносных ксенолитах цирконсодержащих ильменитовых пироксенитов из некоторых трубок Бенчимэ-Куйокского кимберлитового поля ЯАП и внесены в эталонную базу программы «Mineralogical-Analyse» в качестве самостоятельного парагенезиса в виду его существенного отличия от составов других парагенезисов.

Пикроильмениты из неалмазоносных лерцолитов (в том числе катаклазированных) и пироксенитов (клинопироксенитов и диопсидитов), включая гранатильменитовые и флогопит-ильменитовые (НЛП), представлены низкохромистыми разностями (в среднем всего 0,29 мас. % Cr_2O_3) с умеренными содержаниями титана (49,02 мас. % TiO_2) и магния (9,39 мас. % MgO) [6] (табл. 1). По составу пикроильмениты НЛП-парагенезиса несколько схожи с пятью парагенезисами (САП, НГИОП, НИП, НГИП и НГ), объединенными в единую кластерную группу на дендрограмме кластерного анализа (рис. 2), о чем упоминалось выше. Однако по сравнению с этой кластерной группой пикроильмениты НЛП-парагенезиса обладают пониженной хромистостью, а кроме этого более низким содержанием титана (табл. 1). На диаграмме TiO_2 – MgO точка состава пикроильменитов НЛП-парагенезиса расположена в поле типичных кимберлитовых пикроильменитов в средней части кимберлитового тренда [14], между изоплетами с содержанием 10 % и 20 % Fe_2O_3 (рис. 1). На диаграмме Cr_2O_3 – MgO состав пикроильменитов из неалмазоносных лерцолитов и пироксенитов (НЛП) расположен в низкохромистой области в левой части графика, в непосредственной близости от разностей НГ-парагенезиса. Пикроильмениты НЛП-парагенезиса имеют достаточно широкое распространение как в современных, так и в древних ореолах рассеяния в пределах ЯАП и характерны для многих трубок практически всех известных полей, а также характерны и для других регионов мира, в том числе для кимберлитов Анголы. Добавим,

что пикроильмениты с аналогичным составом были также установлены сотрудниками объединения «Аэрогеология» в неалмазоносных ксенолитах ильменитовых пироксенитов из тр. Слюдянка Бенчимэ-Куйокского кимберлитового поля Якутии.

Низкохромистый ильменит из неалмазоносных эклогитоподобных пород и из включений в гранатах (НЭПВГ) по составу наиболее близок к разностям эклогитового парагенезиса, таким как САЭН- и САЭЭПН-парагенезисы, а также к ильменитам из базальтоидов (ИБ), хотя и отстоит от последних на достаточно высоком уровне связывания (рис. 2). От всех названных парагенезисов ильмениты НЭПВГ-парагенезиса отличаются более низкой титанистостью, составляющей в среднем всего 44,01 мас. % TiO_2 [6], а также более высокой концентрацией суммарного железа (53,69 мас. % FeO_{tot}), превышающей даже железистость типичных ильменитов из базальтоидов (табл. 1). На диаграмме TiO_2 – MgO точка состава ильменитов НЭПВГ-парагенезиса находится в низкомагнетиальной области за пределами поля типичных кимберлитовых пикроильменитов, между изоплетами 10 % и 20 % Fe_2O_3 в нижней части графика (рис. 1). На диаграмме Cr_2O_3 – MgO состав данных ильменитов расположен в левом нижнем углу диаграммы в низкохромистой низкомагнетиальной области, в относительной близости от ильменитов из базальтоидов.

Еще на более высоком уровне связывания от предыдущего НЭПВГ-парагенезиса (рис. 2) располагаются низкохромистые ильмениты из потенциально алмазоносных эклогитов (ПАЭН), встречающиеся, в том числе, в ксенолитах алмазоносных пород. Однако при близком содержании общего железа в данных парагенезисах (табл. 1), ильмениты из потенциально алмазоносных эклогитов отличаются от неалмазоносного НЭПВГ-парагенезиса значительно более низкой концентрацией закисного железа (в среднем 37,10 мас. % против 41,95 мас. % FeO) при одновременно более высоком количестве трехвалентного железа (15,08 мас. % против 11,74 мас. % Fe_2O_3). Имеются некоторые отличия и по другим оксидам (табл. 1), хотя и не такие значительные. На диаграмме TiO_2 – MgO точка среднего состава ильменитов из потенциально алмазоносных эклогитов расположена в непосредственной близости от ильменитов НЭПВГ-парагенезиса, в низкомагнетиальной области за пределами поля типичных кимберлитовых пикроильменитов (рис. 1). На графике Cr_2O_3 – MgO состав ильменитов ПАЭН-парагенезиса расположен в левом нижнем углу диаграммы, в низкохромистой низкомагнетиальной области, вблизи от других разностей эклогитового парагенезиса (САЭН, АПЭН, НЭПВГ, САЭЭПН).

Высокохромистые пикроильмениты из потенциально алмазоносных лерцолитов (ПАЛВ) обладают своим индивидуальным составом, отличающимся от остальных парагенезисов, что наглядно демонстрирует кластерная дендрограмма (рис. 2). Помимо повышенных содержаний хрома (в среднем 4,63 мас. % Cr_2O_3) и титана (53,93 мас. % TiO_2), пикроильмениты ПАЛВ-

парагенезиса обладают аномально высокой концентрацией магния, составляющей в среднем 16,01 мас. % MgO [6]. Такой высокой магнезиальностью не обладает больше ни один из парагенезисов среди пикроильменитов, выделяемых программой «MineralogicalAnalyse». При этом для пикроильменитов из потенциально алмазоносных лерцолитов одновременно характерна невысокая железистость, составляющая в среднем всего 24,63 мас. % FeO_{tot} (табл. 1). Отметим, что пикроильмениты подобного состава установлены, в том числе, в виде включений и сростков с алмазами, а также в алмазоносных ксенолитах [6]. На диаграмме TiO_2 -MgO точка среднего состава пикроильменитов ПАЛВ-парагенезиса закономерно располагается в верхнем правом углу графика в высокомагнезиальной высокотитанистой области на значительном удалении от остальных парагенезисов (рис. 1). На графике Cr_2O_3 -MgO состав пикроильменитов данного парагенезиса также существенно оторван от других составов, располагаясь на крайнем правом фланге диаграммы в высокохромистой области. Следует отметить, что высокохромистые пикроильмениты из потенциально алмазоносных лерцолитов встречаются достаточно редко и в незначительных количествах (первые проценты), включая и промышленно алмазоносные кимберлиты. Причем, несмотря на то, что данный парагенезис установлен, в том числе, и в ксенолитах неалмазоносных глубинных пород [6], присутствует он преимущественно в алмазоносных кимберлитовых телах и практически не характерен для неалмазоносных кимберлитов. Поэтому присутствие пикроильменитов ПАЛВ-парагенезиса в ореолах рассеяния должно рассматриваться в качестве положительного фактора, свидетельствующего в пользу потенциальной алмазоносности их коренных первоисточников.

Для низкохромистых пикроильменитов из слабоалмазоносных пироксенитов, вебстеритов и эклогитов (САПВЭН) также характерен свой состав, отличающий их от остальных парагенезисов. Несмотря на то, что на кластерной дендрограмме (рис. 2) данный парагенезис расположен в относительной близости от группы эклогитовых разностей (САЭН, ПАЭН, САЭЭПН, НЭПВГ), хотя и на достаточно высоком уровне связывания, пикроильмениты САПВЭН-парагенезиса обладают составом, промежуточным между типичными кимберлитовыми пикроильменитами и ильменитами из базальтоидов. При достаточно высокой концентрации титана (в среднем 53,92 мас. % TiO_2), они одновременно имеют невысокое содержание магния, в среднем составляющее всего 4,49 мас. % MgO [6]. К тому же помимо низкой хромистости (0,13 мас. % Cr_2O_3), пикроильмениты САПВЭН-парагенезиса обладают повышенным содержанием марганца (0,44 мас. % MnO) и наиболее низкой среди всех парагенезисов концентрацией трехвалентного железа, составляющей в среднем всего 0,51 мас. % Fe_2O_3 (табл. 1). Благодаря такому нестандартному составу пикроильмениты САПВЭН-парагенезиса на диаграмме TiO_2 -MgO расположены за пределами по-

ля типичных кимберлитовых разностей, справа от пунктирной кривой в низкомагнезиальной высокотитанистой области (рис. 1). Таким образом, на данном графике низкохромистые пикроильмениты из слабоалмазоносных пироксенитов, вебстеритов и эклогитов занимают промежуточное положение между типичными кимберлитовыми пикроильменитами и ильменитами из базальтоидов, попадая в так называемый пикритовый тренд [14, 16]. На диаграмме Cr_2O_3 -MgO состав пикроильменитов САПВЭН-парагенезиса расположен в низкохромистой низкомагнезиальной области в левом нижнем углу графика, в непосредственной близости от разностей НПДПЭ-парагенезиса (рис. 1). Добавим, что составы, аналогичные пикроильменитам САПВЭН-парагенезиса, помимо ксенолитов неалмазоносных пироксенитов, вебстеритов и эклогитов, в единичных случаях отмечены в виде включений и сростков с алмазами [6].

Совершенно непохожими на другие парагенезисы составами обладают разности из неалмазоносных диопсидитов, в том числе с высокохромистым ферримагнитным пикроильменитом (НДФ), и разности из неалмазоносных перидотитов и энстатитов с высокохромистым пикроильменитом (НПЭВ). На кластерной дендрограмме данные парагенезисы располагаются на значительном удалении по уровню связывания как друг от друга, так и от остальных парагенезисов (рис. 2). При повышенных содержаниях хрома и глинозема, характерных для обоих парагенезисов (табл. 1), пикроильмениты из неалмазоносных диопсидитов обладают низкими параметрами по титану (в среднем 44,37 мас. % TiO_2) и магнию (6,54 мас. % MgO), в том числе по сравнению с разностями НПЭВ-парагенезиса (47,60 и 13,55 мас. %, соответственно) [6]. Помимо высокой магнезиальности, характерной для пикроильменитов из неалмазоносных перидотитов и энстатитов (НПЭВ), которые по данному параметру уступают лишь пикроильменитам ПАЛВ-парагенезиса, они одновременно обладают невысокой железистостью (37,14 мас. % FeO_{tot}) при аномально низкой концентрации закисного железа, составляющего в среднем всего 18,58 мас. % FeO (табл. 1). Такого низкого содержания двухвалентного железа не отмечено больше ни в одном парагенезисе, что и отличает высокохромистые пикроильмениты НПЭВ-парагенезиса от других составов. На диаграмме TiO_2 -MgO точка состава пикроильменитов НДФ-парагенезиса располагается в поле типичных кимберлитовых разностей слева от пунктирной кривой, в средней части перидотитового тренда [14, 16] между изоплетами 10 % и 20 % Fe_2O_3 (рис. 1). Состав пикроильменитов НПЭВ-парагенезиса на данном графике значительно удален от остальных парагенезисов, располагаясь в верхней части диаграммы, в высокомагнезиальной низкотитанистой области. На диаграмме Cr_2O_3 -MgO средние составы пикроильменитов НДФ- и НПЭВ-парагенезисов расположены в высокохромистой области средней части графика, однако значительно удалены друг от друга по оси магния (рис. 1).

Заклучение

Приведенный выше набор парагенезисов пикроильменитов на сегодня наиболее полно характеризует парагенетическое разнообразие данного минерала. При этом, нельзя исключать того, что в кимберлитах и ореолах рассеяния, связанных с ними, могут иметь место отдельные парагенезисы, которые нам пока не известны. Так, вполне возможно, что и у высокохромистых ферритмагнитных разностей (НПФ- и НДФ-парагенезисы) существуют свои алмазоносные источники в виде глубинных ксенолитов из кимберлитов, составы по пикроильменитам из которых отсутствуют на данный момент в нашем распоряжении. Кроме этого, в ореолах рассеяния встречаются высокомагнезиальные низкотитанистые пикроильмениты, попадающие на диаграмме TiO_2 - MgO в верхнюю часть графика слева от изоплеты с содержанием 20 мас. % Fe_2O_3 , источники которых не совсем ясны. Однако преимущество программы «MineralogicalAnalyse» является то, что в ней заложена возможность внесения в любой момент дополнительных составов-парагенезисов в эталонную базу.

Выделенные парагенезисы среди пикроильменитов позволяют более достоверно судить о глубинных источниках данного минерала в кимберлитах. Особенности состава пикроильменитовых парагенезисов, совместно с парагенетическими особенностями других кимберлитовых минералов, могут быть использованы для оценки потенциальной алмазоносности конкретных тел, что в конечном итоге существенно повысит качество прогнозных построений при алмазопроисковых работах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сафронов, А. Ф. Сравнение составов гранатов из порфирировых выделений в кимберлитовых породах, концентрата обогащения и ксенолитов ультраосновных пород / А. Ф. Сафронов, Г. В. Зольников, В. Ф. Махотько // Парагенезисы минералов кимберлитовых пород. – Якутск, 1981. – С. 23–35.
2. Доусон, Дж. Кимберлиты и ксенолиты в них / Дж. Доусон. – М.: Мир, 1983. – 300 с.
3. Мацюк, С. С. Оптические спектры и окраска мантийных минералов в кимберлитах / С. С. Мацюк, А. Н. Платонов, В. М. Хоменко – Киев: Наук. думка, 1985. – 248 с.

АК «АЛРОСА» (ПАО), Вилюйская геологоразведочная экспедиция, Республика Саха (Якутия), п. Айхал

Власова Эльвира Александровна, геолог II категории
E-mail: KulaninaEA@alrosa.ru
Тел.: +7 (411) 366 66 66 (7 85 24)

Хмельков Александр Михайлович, кандидат геолого-минералогических наук, ветеран АК «АЛРОСА» (ПАО)
E-mail: st_56@mail.ru
Тел.: +7 (834) 275 56 69

4. Mitchell, R. H. Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology / R. H. Mitchell. – New York. Plenum Press. 1986. – P. 442.
5. Включения в алмазе и алмазоносные породы / В. К. Ггарин [и др.]. – М.: Из-во МГУ, 1991. – 240 с.
6. Новые технологии разведки алмазных месторождений / В. В. Кротков [и др.]. – М.: ГЕОС, 2001. – 310 с.
7. Хмельков, А. М. Совершенствование методов прогнозирования при алмазопроисковых работах на основе современных технологий обработки и разделения составов кимберлитовых минералов на парагенезисы / А. М. Хмельков, А. В. Гриценко, Э. А. Хмелькова // Современные проблемы геологии и разведки полезных ископаемых: матер. Международной научной конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – С. 546–550.
8. Хмельков, А. М. Разделение составов кимберлитовых минералов на парагенезисы с использованием современных технологий / А. М. Хмельков, А. В. Гриценко // Геологическое обеспечение минерально-сырьевой базы алмазов: проблемы, пути решения, инновационные разработки и технологии: матер. IV Региональной научно-практической конференции. – Мирный, 2014. – С. 241–244.
9. Хмельков, А. М. Парагенезисы гранатов из кимберлитов / А. М. Хмельков, Э. А. Власова // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. — 2018. – № 4. – С. 9–19.
10. Архангельская алмазоносная провинция. / О. А. Богатиков [и др.]. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 524 с.
11. Бовкун, А. В. Минералогия оксидов из связующей массы кимберлитов Якутии (генетические и прикладные аспекты): автореф. дисс. канд-та. геол.-мин. наук : 04.00.20 / Бовкун Анжелика Валериевна ; М.: Геол. ф-т МГУ, 2000. – 22 с.
12. Каминский, Ф. В. Алмазоносность некимберлитовых изверженных пород / Ф. В. Каминский. – М.: Недра, 1984. – 173 с.
13. Атлас коренных месторождений алмаза Якутской кимберлитовой провинции / С. И. Костровицкий [и др.]. – Мирный, ООО «МГТ», 2015. – 500 с.
14. Хмельков, А. М. Основные минералы кимберлитов и их эволюция в процессе ореолообразования (на примере Якутской алмазоносной провинции) / А. М. Хмельков. – Новосибирск: АРТА, 2008. – 252 с.
15. Лапин, А. В. Кимберлитовые и конвергентные породы: формационные петрогеохимические критерии / А. В. Лапин, А. В. Толстов, Д. В. Лисицин. – М.: ИМГРЭ, 2004. – 226 с.
16. Хмельков, А. М. Особенности состава ильменита из кимберлитов и конвергентных им пород / А. М. Хмельков // Геология алмазов – настоящее и будущее. – Воронеж: ВГУ, 2005. – С. 720–724.

ALROSA (PJSC), Vilyuiskaya geological expedition, Sakha (Yakutia) Republic, Aikhal

Vlasova E. A., geologist II category
E-mail: KulaninaEA@alrosa.ru
Tel.: +7 (411) 366 66 66 (7 85 24)

Khmelkov A. M., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, veteran of ALROSA (PJSC)
E-mail: st_56@mail.ru
Tel.: +7 (834) 275 56 69