

*Е.Р. ВАСИЛЬЕВА, В.В. ВЕРЖАК, В.К. ГАРАНИН
Н.В. ГРАЧЕВА, Г.П. КУДРЯВЦЕВА*

*** КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНАТОВ ОРАНЖЕВОЙ ОКРАСКИ ОДНОЙ ИЗ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК СССР**

Гранат является одним из основных минералов тяжелой фракции кимберлитовых пород. В кимберлитовых телах он встречается в виде вкрапленников в кимберлитовом цементе, в ксенолитах ультраосновных и основных пород, во включениях в алмазе и сростках с ним. По этим причинам изучение особенностей состава и физических свойств гранатов связано с решением таких актуальных проблем, как генезис кимберлитов, выяснение глубинного строения земной коры и верхней мантии, а также прикладных задач поисков кимберлитов и оценки их алмазоносности.

Типоморфные особенности состава и физических свойств (прежде всего окраска) гранатов (пиропов) ультраосновного парагенезиса изучены достаточно подробно и достаточно успешно применяются при поисках алмазоносных кимберлитов [6, 8, 14]. Однако имеется существенный "пробел" в исследованиях гранатов оранжевой окраски. Актуальность их изучения определяется тем, что оранжевой окраской обладают гранаты пироп-альмандинового ряда из эклогитов мантийного происхождения, в том числе и алмазоносных. Вместе с тем критерии отличия подобных гранатов от сходных по окраске минералов из разнообразных пород метаморфических комплексов, прорываемых кимберлитовыми трубками, до сих пор не разработаны.

ОБЪЕКТ, ЦЕЛИ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект изучения в данной работе — оранжевые гранаты, отобранные из концентрата обогащения одной из кимберлитовых трубок СССР. До последнего времени вопрос о присутствии в рассматриваемой трубке и других кимберлитовых телах этого района алмаза эклогитового парагенезиса оставался открытым. Находки гранатов оранжевой окраски, включенных в алмаз, а также преобладание этой цветовой разновидности минерала в монофракциях гранатов из кимберлитовых пород рассматриваемого района явились основанием для проведения детальных комплексных исследований гранатов.

Изученная коллекция включала 750 зерен гранатов фракции от -1 до $+0,5$ мм из концентратов обогащения кимберлитов и 60 ксенолитов гранатосодержащих пород, отобранных из керна шести скважин. Комплексное исследование предполагало использование на первой стадии массового изучения гранатов простых и экспрессных методов (визуальное наблюдение зерен под бинокулярной лупой, петрографическое описание гранатосодержащих пород), что позволило выделить по определенным признакам группы образцов. Типичные представители каждой из этих групп затем изучались более трудоемкими и менее доступными методами (растровая электронная микроскопия, оптическая спектроскопия с расчетом колориметрических параметров, электронно-зондовый анализ). Основные цели исследований следующие:

1. Установление генетических групп гранатов оранжевой окраски из пород трубки и определение условий их кристаллизации.

2. Выявление типоморфных особенностей гранатов эклогитового (мантийного) парагенезиса и разработка экспресс-методов их идентификации.

Морфологические особенности изучены для всех зерен гранатов из концентратов обогащения, 96 образцов исследованы методом оптической спектроскопии, выполнено 36 электронно-зондовых анализов, выявлено 112 зерен гранатов с включениями и проведена их диагностика.

Морфология зерен гранатов

На первом этапе исследования все отобранные зерна гранатов были просмотрены под бинокулярной лупой и проведено описание их морфологических особенностей, включающее характеристику сохранности, формы зерен и типа поверхности. Сохранность зерен свидетельствует о степени их механической переработки. Выделены целые и слегка поврежденные зерна, обломки и осколки. Форма зерен отражает условия кристаллизации и степень их избирательного реакционного травления. Различают ограненные или с элементами огранки, округло-овальные и неправильные зерна. Характер поверхности зерен свидетельствует о степени травления и наличии или отсутствии коррозии. По характеру поверхности зерна могут быть гладкими и корродированными (рис.1). Корродированная поверхность, в свою очередь, может быть матированной, скульптурированной (в основном представленной черепитчатым рельефом — скульптурой в форме уплощенных четырехгранных пирамид) и ямчато-бугорчатой. Кроме того, в процессе морфологического изучения фиксировались находки включений в гранатах, отмечалась их форма и цвет.

В ходе исследования морфологических особенностей были построены гистограммы распределения зерен по сохранности, изменению формы и типу поверхности (рис. 2). Обобщения производились по типам пород, встречающихся в диатреме (автолитовой

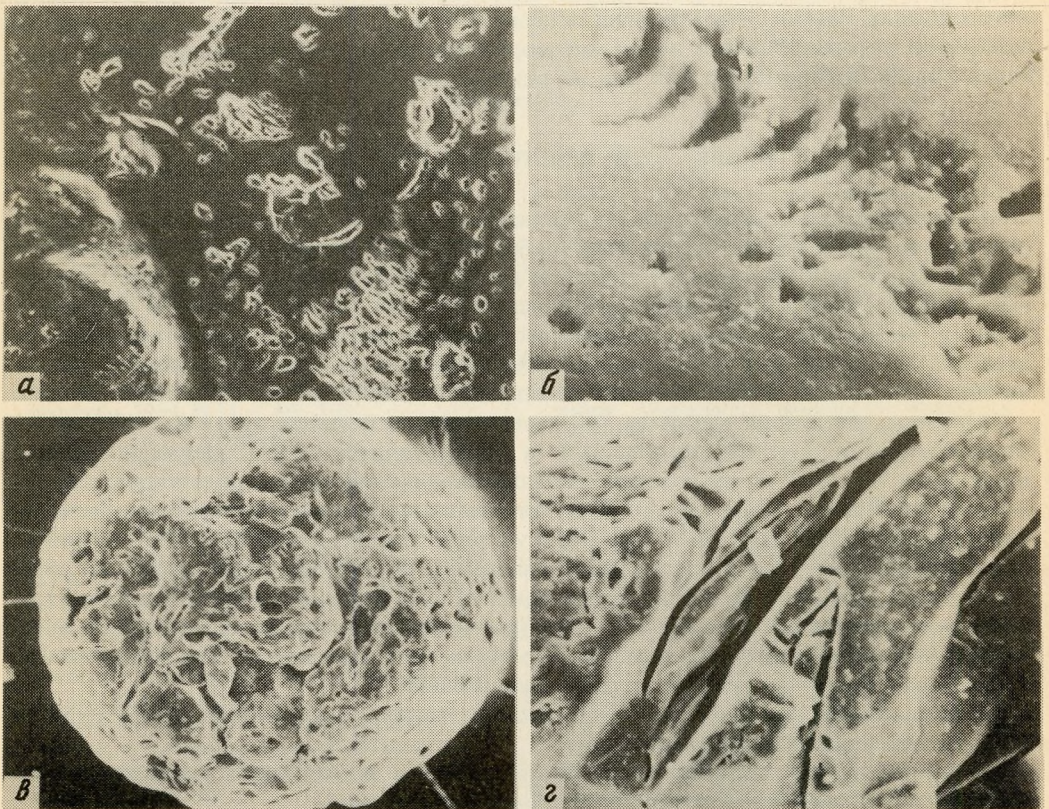


Рис. 1. Зерна гранатов с различными типами микрорельефа из брекчии вмещающих пород с кимберлитовым цементом
 а, б — с гладкой поверхностью и фасеточным микрорельефом; в, г — с коррозионным микрорельефом. Изображения во вторичных электронах; увел. 350, 750, 100, 750 соответственно

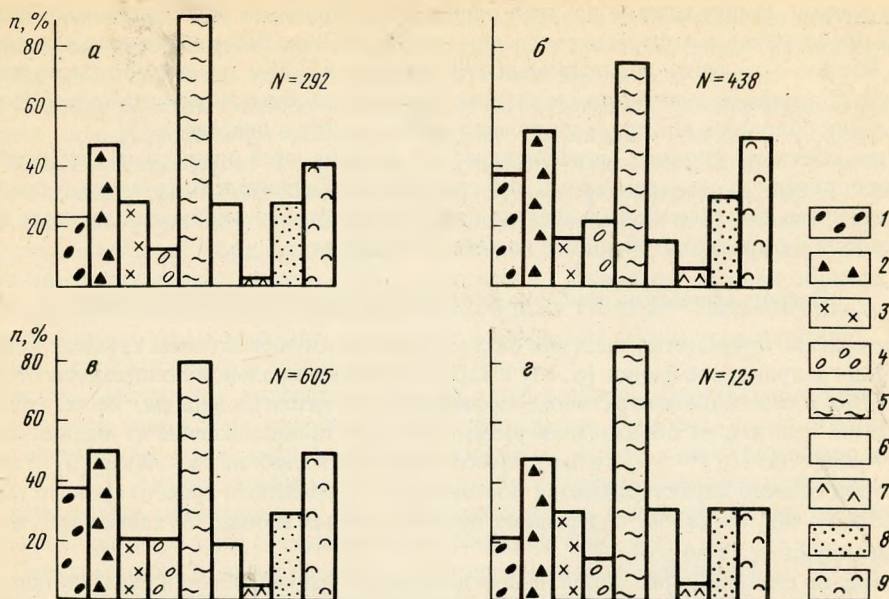


Рис. 2. Гистограммы распределения оранжевых гранатов с различными морфологическими особенностями по двум типам кимберлитовых пород

а – автолитовой кимберлитовой брекчии; *б* – брекчии вмещающих пород с кимберлитовым цементом; *в* – верхние, *г* – нижние горизонты (разделение условно: к верхним горизонтам отнесены гранаты из проб, отобранных на глубине 10–180 м, к нижним – 180–360 м.). *n* – частота встречаемости; *N* – число изученных зерен. 1 – целые и поврежденные; 2 – расколотые и обломки; 3 – осколки; 4 – округло-овальные; 5 – неправильные; 6 – с гладкой; 7 – с черепитчатой; 8 – с тонкоматированной; 9 – с ямчато-бугорчатой поверхностью

кимберлитовой брекчии и брекчии вмещающих пород с кимберлитовым цементом), и по глубине (верхние и нижние горизонты). Анализ распределения показал, что зерна гранатов оранжевой окраски распределены неравномерно: 1) большая часть зерен (60%) обнаружена в брекчии вмещающих пород с кимберлитовым цементом. В этих же породах отмечается больший процент целых, округло-овальных зерен с тонкоматированной и ямчато-бугорчатой поверхностью; 2) при сравнении распространения зерен по горизонтам обнаружено их значительное преобладание в протолочках из проб, взятых из верхних горизонтов (83%), причем также отмечался больший процент целых округло-овальных зерен с ямчато-бугорчатым рельефом поверхности. Дальнейшее уточнение характера поверхности зерен минерала, который связан с интенсивностью и последовательностью первичных и вторичных процессов минералообразования, проводилось на раствором электронном микроскопе JSM-T20 фирмы "Джеол" (Япония) по ранее описанной методике [4].

На поверхности зерен с гладкой блестящей поверхностью обнаружен тонкий каплевидный микрорельеф, характерный для гранатов из кор выветривания по кимберлитам [1, 17]. Для этих же зерен отмечалась "фасеточная" скульптура (см. рис. 1, *а*, *б*), образующаяся, как правило, в результате механического истирания [18, 19]. Подобные микроморфологические особенности, по-видимому, связаны с условиями образования и указывают на их ксеногенный и, вероятно, метаморфогенный генезис.

Микрорельеф зерен гранатов с тонкоматированной поверхностью обусловлен присутствием большого количества мелких каверн, возникающих вследствие реакционного растворения минерала [1]. Ямчато-бугорчатая поверхность сформирована совокупностью слегка вытянутых округлых или чечевицеобразных впадин, образованных в процессе коррозионного растворения [1, 17]. Часть этих впадин может быть заполнена кимберлитовым цементом. Гранаты со скульптурированной, черепитчатой поверхностью до-

волю редки. Наблюдаемый на этих зернах геометрически индивидуализированный рельеф представлен в виде четырехгранных пирамид, как бы наслаивающихся друг на друга. Вопрос о генезисе наблюдаемых скульптурных форм до сих пор дискусионен [2], однако имеются данные, позволяющие считать подобные образования результатом регенерации обломков минерала в процессе метасоматоза и диагенеза [5].

Таким образом, изучение морфологических особенностей оранжевых гранатов выявило ряд признаков, не характерных для гранатов кимберлитового генезиса, и послужило основанием для тщательных исследований ксенолитов с видимыми зернами гранатов оранжевой окраски, отобранных из керна скважины.

Петрографическое описание ксенолитов гранатосодержащих пород

В литературе приводятся сведения о присутствии в кимберлитовых трубках ксенолитов пород гранулитовой фации [6, 13] с характерной минеральной ассоциацией $Gr + Pl + Crx + Orx$ и аксессуарными рутилом, амфиболом, биотитом и кварцем. Расчет термодинамических условий их образования указывает на их происхождение из нижних зон коры ($T = 550-700^\circ\text{C}$, $P = 5-13$ кбар), что соответствует глубине 18–39 км [6]. Гранаты этих пород обычно характеризуются постоянным содержанием гроссулярового минала (15–25 мол. %), тогда как содержания других главных миналов — альмандина и пирропа — варьируют от 15 до 55%.

Авторы не ставили перед собой задачи детального фациального и парагенетического анализа ксенолитов некимберлитового происхождения. Изучение ксенолитов проводилось с целью оценки наличия гранатов из ксенолитов в концентрате диатремы.

Ксенолиты из пород изучаемой трубки представляют собой неправильные обломки размером от 1 до 7–8 см, со сглаженной поверхностью, сильно измененные, довольно хрупкие, нередко с массивной или полосчатой текстурой. Гранаты, отобранные при дроблении ксенолитов, имеют размер не более 1 мм. Окраска их оранжевая разных оттенков, чаще оранжево-красная. Все зерна неправильной формы, сильно трещиноваты, часто содержат вроски других минералов. Ксенолиты, содержащие гранат, не принадлежат образованиям высоких ступеней метаморфизма и ранее не были описаны в кимберлитах.

Выделены пять основных типов ксенолитов. К I отнесены меланократовые породы средне- и крупнокристаллические. Главные минералы — амфибол (50%) и плагиоклаз (40%). Второстепенные минералы представлены развивающимися по трещинам мелкозернистым агрегатом альбита, магнетитом и гранатом и в количественном отношении не превышают 10%. Большинство ксенолитов (тип II) представлено породами, состоящими из роговой обманки, и незначительным количеством биотита, погруженного в слюдисто-карбонатный агрегат. Гранаты (до 7–10%, что существенно выше, чем в кимберлитах данного района) обнаружены в породах III типа, состоящих на 50–60% из эпидота, погруженного глинисто-карбонатной массой, в которой в сростании с эпидотом находятся роговая обманка, гранат и магнетит. Главные минералы IV типа — роговая обманка, биотит, калиевый полевой шпат, плагиоклаз и кварц. Аксессуары минералы — магнетит, хлорит, апатит, сфен, гранат и рутил. Предположительно породы отнесены к диоритогнейсам. Породы с аналогичным минеральным составом, но с цветным числом, не превышающим 20–25%, и количеством кварца менее 20–28% отнесены к гранодиоритогнейсам. И наконец, к сланцам (V тип) отнесена находка меланократовой, существенно биотитовой породы со сланцевой текстурой. Биотита — до 80%, присутствуют плагиоклаз, кварц и гранат.

Опико-спектроскопические и колориметрические исследования

К сожалению, из-за слишком малого размера и трещиноватости образцы гранатов из ксенолитов не удалось изучить методом оптической спектроскопии. Образцы из концентрата диатремы были предварительно разделены визуально по различным оттенкам оранжевого цвета: на красно-оранжевые, густо-оранжевые, оранжевые, розово-оранжевые

и желто-оранжевые. Для оптико-спектроскопического изучения образцы выбирались таким образом, чтобы были представлены все визуально различающиеся группы, причем из наиболее многочисленных из них выбиралось большее количество зерен.

Оптические спектры поглощения получены на двухлучевом универсальном регистрирующем спектрофотометре MPS-2000 фирмы "Шимадзу" (Япония) с ЭВМ IF-800 для управления прибором и обработки результатов измерений. Следует отметить, что спектры с минералогических объектов на данном спектрофотометре в нашей стране получены впервые, причем применялась оригинальная методика закрепления препаратов. Плоскопараллельные образцы гранатов известной толщины запрессовывались в свинцовые пластинки черного цвета, одна из пластинок ставилась в отсек образца, а вторая, с отверстием, регулируемым размером образца граната, — перед входной щелью пучка сравнения, что позволило уравновесить мощность падающего излучения. Запись спектров осуществлялась в диапазоне 800–380 нм.

Спектры поглощения интерпретировались с точки зрения качественного содержания хромофорных ионов и их сравнительной концентрации. При этом использовались данные о положении полос поглощения хромофорных ионов, заимствованные из работ [8, 10, 12, 15]. Анализ конфигурации области пропускания спектров позволил установить присутствие определенных хромофорных центров и оценить их соотношение. На этом основании выделены следующие типы спектров (рис. 3).

1. Спектры типа А характеризуются интенсивной полосой заряда $O^{2-} \rightarrow Fe^{3+}_{IV}$, на которую накладываются полосы поглощения центров Fe^{2+}_{VII} (14800, 16000, 17400, 18800, 19900, 20000, 23000 cm^{-1}).

2. Спектры типа Б отличаются высокой интенсивностью полосы переноса заряда $O^{2-} \rightarrow Fe^{3+}_{IV}$, интенсивными полосами Fe^{2+}_{VII} (14300, 16200, 17540, 18400, 19900 cm^{-1}). Кроме того, фиксируются хорошо проявленные полосы 23100 и 24400 cm^{-1} , которые были отнесены к полосам поглощения ионов Mn^{2+}_{VIII} , а также слабая полоса Mn^{2+}_{VII} (21750 cm^{-1}).

3. Спектры, отнесенные к типу В, характеризуются некоторым преобладанием полосы поглощения Mn^{2+}_{VIII} (21760, 23370, 24400) над полосами Fe^{2+}_{VI} (14800, 16400, 17540, 18700, 19800, 20400) и полосой переноса заряда $O^{2-} \rightarrow Fe^{3+}_{IV}$.

4. На спектрах типа Г отмечаются примерно равной интенсивности полосы поглощения Fe^{2+}_{VII} (дублет 19900–20200 cm^{-1}) и Fe^{3+}_{VI} (дублет 23280–23800 cm^{-1}). Остальные полосы, кроме 21750 и 21400 cm^{-1} , относятся к хромофорному центру Fe^{2+}_{VIII} (14600, 16130, 17540, 18800 cm^{-1}), их сравнительно высокая интенсивность свидетельствует все же о преобладании этого центра.

5. Окраска гранатов со спектрами типа Д почти полностью определяется хромофорными центрами Fe^{2+}_{VII} , дающими полосы высокой интенсивности: 14300, 16000, 17540, 18800, 19900–20200, 21400, 23200 cm^{-1} . В некоторых образцах к ним добавляются, по-видимому, центры Mn^{2+}_{VIII} , усиливающие пик 23200 cm^{-1} , отсутствие полос 24400 и 21750 cm^{-1} свидетельствует о низкой концентрации этих центров, связанных с концентрацией Mn^{2+}_{VIII} .

6. Спектрам типа Е свойственно резкое преобладание по интенсивности полосы Fe^{2+}_{VII} (20000–20200 cm^{-1}) и других полос этого центра (14300, 16130, 17540 cm^{-1}). Особенностью спектров этого типа является наличие достаточно интенсивных полос 23700 и 23800 cm^{-1} , которые могут быть связаны либо с центрами $Fe^{2+} \rightarrow Ti^{3+}_{IV,VI}$, либо с центрами Mn^{2+} . Достаточно интенсивной остается и полоса переноса заряда $O^{2-} \rightarrow Fe^{3+}_{IV}$.

Существуют также промежуточные типы спектров, по-видимому, связанные с постепенными переходами от Mn-содержащих к безмарганцовистыми разновидностями граната. Кроме описанных типов, был зафиксирован оптический спектр поглощения, резко отличающийся от них наличием двух интенсивных полос поглощения Cr^{3+} (17700 и 24500 cm^{-1}), осложненных полосами Fe^{2+}_{VII} (18800, 20200 cm^{-1}), которые обуславливают оранжевые тона окраски минерала. По типу спектра гранаты отнесены к пиропальмандинам. Учитывая малую представительность образцов (всего два из 96 указан-

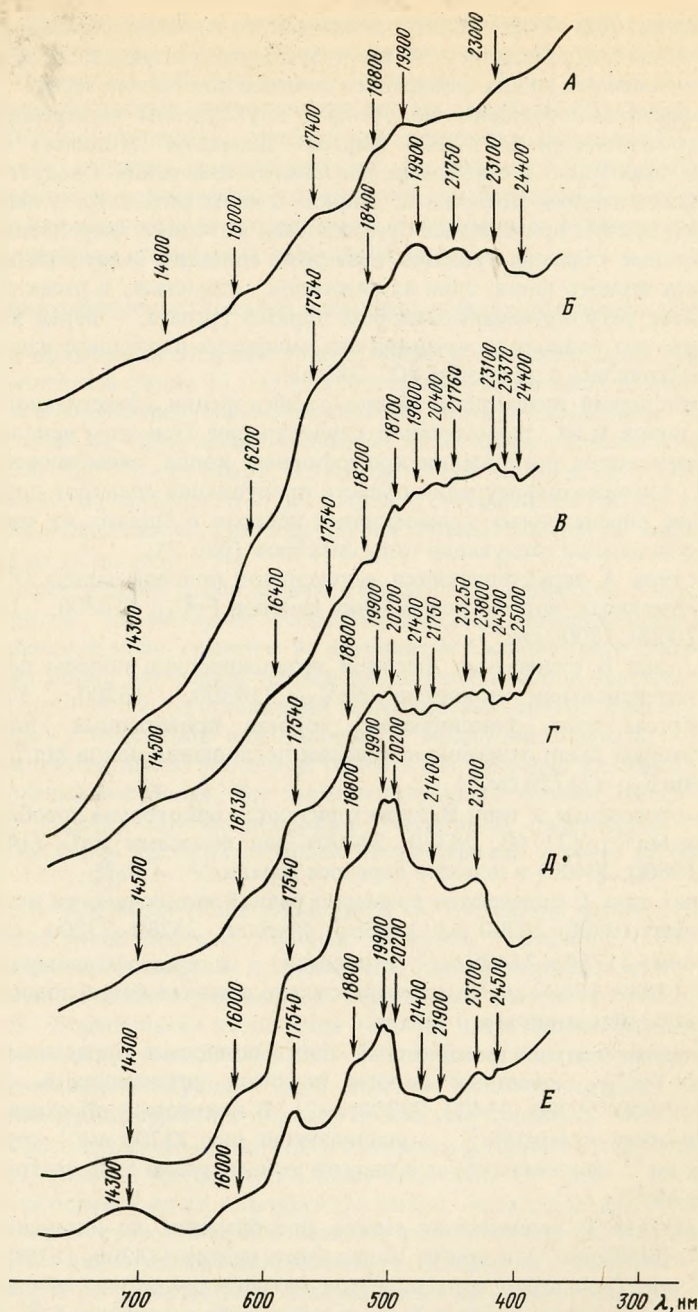


Рис. 3. Типы оптических спектров оранжевых гранатов, отобранных из концентрата диатремы

ных), а также резкое отличие их от остальных исследуемых образцов, в дальнейшем внимание им не уделялось. Следует отметить, что ставролит, зерна которого при визуальной диагностике иногда ошибочно принимают за гранат, надежно отличается по доминирующей полосе переноса заряда $O^{2-} \rightarrow Fe_{IV}^{3+}$, осложненной слабо проявленными полосами 15150, 16950, 18180, 18870, 20200 cm^{-1} [3].

При выяснении генезиса гранатов по их оптическим свойствам целесообразно ис-

Т а б л и ц а 1

Опτικο-спектроскопическая и колориметрическая характеристика гранатов

№ п/п	Номер образца	X	Y	λ_k , нм	p_c , отн. ед.	Тип спектра	Набор хромоформных центров
1	417-8,9 (15)	0,498	0,376	593	0,66	A	$Fe_{VIII}^{2+} + Fe_{IV}^{2+} + Fe_{VI}^{2+}$
2	477-1,4 (3)	0,586	0,365	598,5	0,76	Б	$Fe_{VIII}^{2+} + Mn_{VIII}^{2+} + Fe_{VI}^{2+}$
3	417-8,9 (11)	0,631	0,352	604	0,96	В	$Fe_{VIII}^{2+} + Fe_{VI}^{2+} + Fe_{IV}^{2+} + Mn_{VIII}^{2+}$
4	415-14,17 (1)	0,601	0,363	600	0,93	В	То же
5	477-1,4 (8)	0,517	0,376	594	0,72	В	"
6	477-1,4 (1)	0,613	0,362	599	0,89	В	"
7	415-16 (4)	0,608	0,382	597	0,97	Г	$Fe_{VIII}^{2+} + Fe_{VI}^{2+} + Fe_{IV}^{2+}$
8	477-1,4 (2)	0,4970	0,373	593	0,66	Д	$Fe_{VIII}^{2+} + Mn_{VIII}^{2+}$
9	475-1 (7)	0,481	0,382	591	0,64	Д	То же
10	415-14,17 (6)	0,554	0,372	596	0,82	Е	$Fe_{VIII}^{2+} + Fe_{IV}^{2+}$
11	415-1,2 (9)	0,537	0,372	595	0,80	Е	То же
12	415-1,2 (6)	0,541	0,372	595,5	0,79	Е	"

пользовать опыт, накопленный при исследованиях этого минерала из кимберлитов Якутии. Однако среди якутских образцов не были зафиксированы гранаты со столь высоким содержанием Mn^{2+} , чтобы это отразилось на конфигурации области пропуска спектров, поэтому представляется необоснованным выделение парагенезисов гранатосодержащих пород по типам спектров Mn-содержащих гранатов, по аналогии с якутскими. Это было бы возможно лишь в том случае, если принять в качестве источника марганца в гранатах повышенную его концентрацию в кимберлитовом субстрате данного региона, однако тогда все гранаты были бы "заражены" этим элементом, что противоречит результатам оптико-спектроскопического анализа. Скорее всего, Mn-содержащие гранаты имеют некимберлитовый генезис.

Сравнение типов спектров безмарганцовистых гранатов с ранее изученным минералом из Якутии [8] показало, что по спектральной картине гранаты, относящиеся к типу Г, наиболее близки к магнезиально-железистым эклогитам, а к типам А и Е — к биминеральным гранат-клинопироксеновым эклогитам. Ни один из полученных спектров не был отнесен к спектрам гранатов из алмазоносных и потенциально-алмазоносных эклогитов, которые характеризуются доминирующей ролью полосы Fe_{VI}^{3+} 23250 cm^{-1} и полос центров $O^{2-} \rightarrow Fe_{IV}^{3+}$, $Fe_{VIII}^{2+} \rightarrow T_{IV,VI}^{4+}$ [8].

Статистическая обработка результатов анализа оптических спектров поглощения (рис. 4) указывает на несовпадение этих данных с предварительной визуальной оценкой цветности. Очевидно преобладание среди оранжевых гранатов концентрата обогащения диаграммы Mn-содержащих гранатов (70,6%) предположительно некимберлитового генезиса.

Колориметрические параметры λ_k и p_c , рассчитанные для групп гранатов, выделенных по типам спектров, приведены в табл. 1 и нанесены на модифицированную диаграмму цветности гранатов, построенную по результатам изучения гранатов из глубинных парагенезисов Якутии [8]. На рис. 5 представлен фрагмент этой диаграммы, в которой располагаются фигуративные точки изученных образцов. Очевидно, что подобная операция некорректна, поскольку диаграмма разработана для безмарганцовистых гранатов, а исследуемые образцы, содержащие марганец в том или ином количестве, попали в области с другим набором хромоформных центров. После этой операции подверглись уточнению поля безмарганцовистых гранатов. Так, обр.

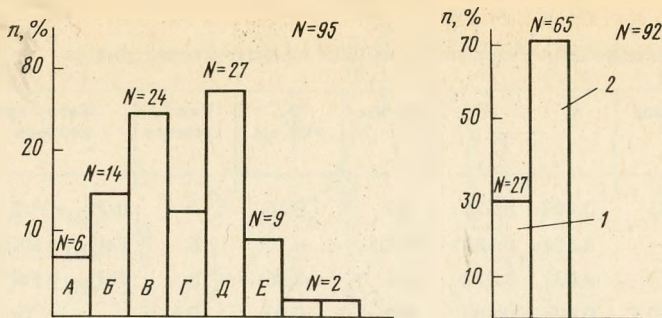


Рис. 4. Гистограммы распределения по типам спектров гранатов оранжевой окраски из концентрата диатремы

n – частота встречаемости; N – число зерен. 1 – безмарганцовистые гранаты (A+Г+E); 2 – Mn-содержащие гранаты (B+B+Д)

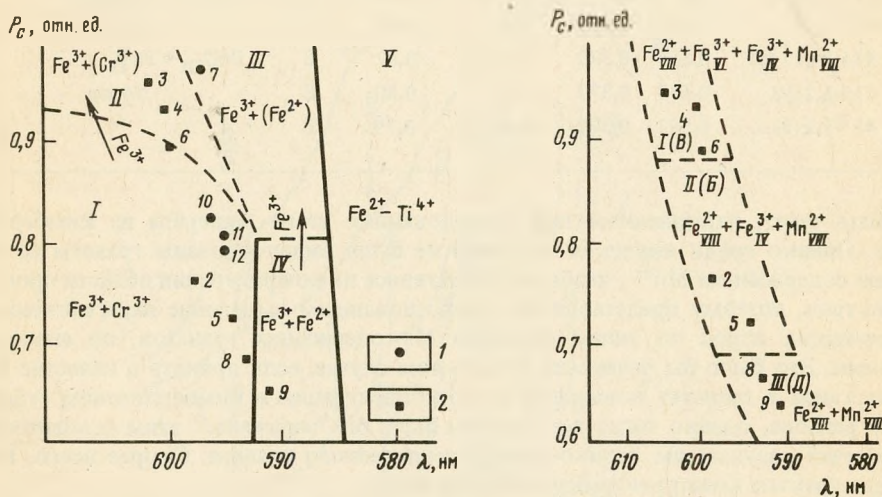


Рис. 5. Фрагмент модифицированной диаграммы цветности (по [8]) с нанесенными точками исследуемых гранатов

Оконтурированы поля гранатов с различными хромоформными центрами из кимберлитов Якутии: I – из катаклазированных лерцолитов; II – из ильменитовых перидотитов; III – из биминеральных магниезальных эклогитов; IV – магниезально-железистых эклогитов; V – алмазонасных и потенциально алмазонасных дистеновых эклогитов. 1 – безмарганцовистые гранаты; 2 – Mn-содержащие гранаты. Цифры у точек соответствуют порядковым номерам образцов в табл. 1

Рис. 6. Фрагмент модифицированной диаграммы для Mn-содержащих разновидностей оранжевых гранатов концентрата диатремы

I–III – выделенные поля преобладания тех или иных хромоформных ионов. Б, В, Д – типы оптических спектров поглощения. Остальные условные обозначения те же, что на рис. 5

415-14,17 (6), 415-1,2 (9), 415-1,2 (6), 417-8,9 (15) с определенными типами спектра (E и A), близкими к биминеральным магниезальным эклогитам, попали в область катаклазированных лерцолитов, на спектрах которых отмечается прежде всего наличие интенсивных широких полос $\text{Cr}^{3+}_{\text{VI}}$. По-видимому, границы на универсальной модифицированной диаграмме [8] требуют уточнения, что указывает на неуниверсальность этой диаграммы и на необходимость выделения полей преобладания тех или иных хромоформных центров в каждом конкретном случае.

На рис. 6 приведена диаграмма цветности для Mn-содержащих гранатов из изученной трубки, пригодная для типизации оптических спектров этого минерала и других диат-

рем района. На ней по преобладанию тех или иных хромофорных центров выделены три поля. Поле *I* характеризуется присутствием $\text{Fe}^{2+}_{\text{VIII}} + \text{Fe}^{3+}_{\text{VI}} + \text{Fe}^{3+}_{\text{IV}} + \text{Mn}^{2+}_{\text{VIII}}$ (концентрация соответствует порядку написания), отличаясь сравнительно низкой концентрацией $\text{Mn}^{2+}_{\text{VIII}}$. Поля *II* и *III* характеризуются присутствием $\text{Fe}^{2+}_{\text{VIII}} + \text{Mn}^{2+}_{\text{VIII}} + \text{Fe}^{3+}_{\text{IV}}$ и $\text{Fe}^{2+}_{\text{VIII}} + \text{Mn}^{2+}_{\text{VIII}}$ соответственно, отличаясь друг от друга лишь присутствием $\text{Fe}^{3+}_{\text{IV}}$, устанавливаемого по интенсивности полосы переноса заряда $0^{2-} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$, и от типа *I* большими концентрациями центров $\text{Mn}^{2+}_{\text{VIII}}$. Выделенные поля на диаграмме разделены большими интервалами, что, однако, может быть связано с недостаточным количеством образцов, проанализированных оптико-колориметрическим методом. Вертикальные границы на рис. 6 по этой же причине условны, тем не менее обращает на себя внимание факт приуроченности всех Mn-содержащих образцов к особой субвертикальной зоне. В дальнейшем выделенные на основании оптико-спектроскопических исследований поля уточнены на основе их химического состава и было отмечено их высокое соответствие друг другу.

Химический состав

Методом электронно-зондового анализа определен состав для образцов гранатов, разделенных предварительно на группы на основании оптико-спектроскопических измерений, и для гранатов из ксенолитов некимберлитовых пород. Анализ выполнен на рентгеновском микроанализаторе JXA-50A с компьютером фирмы "Джеол" (Япония) при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе зонда $2 \cdot 10^{-8}$ А. В качестве эталонов на Na, K, Ca, Si использовалось гомогенное стекло известного состава, на Mg, Al, Cr, Ti, Fe – оксиды MgO , Al_2O_3 , Cr_2O_3 , TiO_2 и Fe_2O_3 соответственно. При обработке результатов анализов применялся кислородный метод пересчета: исходя из содержания атомов кислорода рассчитывалось содержание катионов, ко-

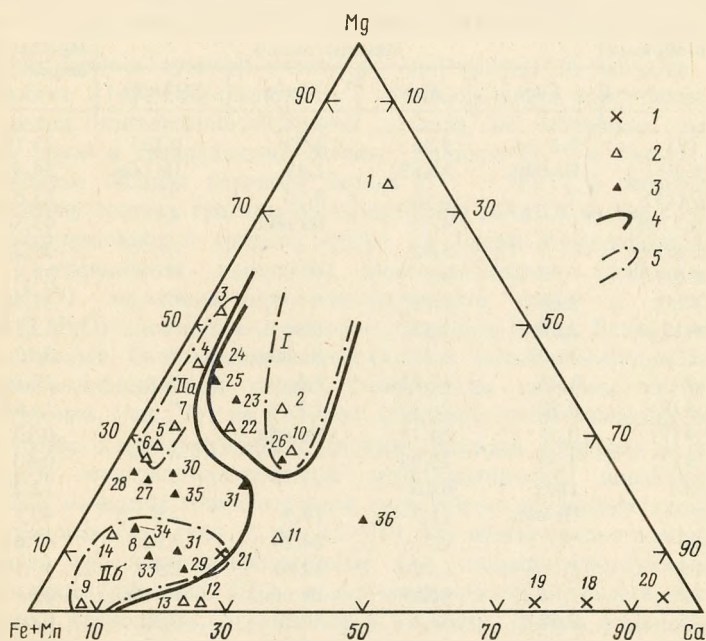


Рис. 7. Диаграмма Ca-Mg-(Fe+Mn) компонентов для гранатов оранжевой окраски из диатремы Оконтуры поля составов: *I* — из магнезиально-железистых эглогитов, *II* — гранатов некимберлитового генезиса (*IIa* — низко- и безмарганцовистых гранатов, *IIb* — высокомарганцовистых гранатов). Цифры у точек соответствуют номерам анализов в табл. 2 и 3. 1 — точки составов гранатов некимберлитового генезиса; 2 — точки составов граната из концентрата, 3 — точки составов гранатов с включениями; 4 — границы выделенных полей; 5 — границы низко- и высокомарганцовистых гранатов

Таблица 2

Химический состав гранатов из концентратов обогащения и ксенолитов гранатосодержащих пород по результатам электронно-зондового анализа

Номер анализа	Номер образца	Оксиды, мас.%					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	MgO	CaO
1	415-7 (9)	41,91	21,47	0,42	0,44	20,76	5,76
2	415-16 (4)	39,15	22,23	Не обн.	Не обн.	8,95	6,86
3	417-89 (15)	38,85	24,27	"	"	14,19	1,19
4	415-14,17 (6)	38,20	23,68	"	"	11,30	1,45
5	415-12 (6)	39,45	22,84	"	"	7,4	1,28
6	415-12 (9)	39,69	23,09	"	"	6,95	1,22
7	477-14 (3)	38,58	22,50	"	1,19	7,98	1,66
8	415-14,17 (1)	38,74	21,20	"	3,28	2,94	3,62
9	475-1 (7)	38,07	22,03	"	4,31	0,04	2,17
10	417-8,9 (11)	39,11	22,50	"	0,57	5,41	10,31
11	477-1,4 (8)	36,31	22,22	"	0,20	2,92	10,76
12	477-1,4 (1)	37,7	23,91	"	0,24	0,07	8,04
13	477-1,4 (2)	38,26	21,56	"	0,34	0,09	7,59
14	445-9 (6)	37,43	21,88	"	7,81	3,00	2,07
15	514-81	41,14	10,51	0,90	Не обн.	10,38	10,26
16	438-120	41,89	9,92	0,68	"	11,86	14,58
17	418-306	41,34	9,46	0,82	"	12,16	14,18
18	502-110	39,40	24,11	Не обн.	"	0,05	25,58
19	504-115	42,05	9,14	0,29	0,3	0,01	26,31
20	502-138	37,87	6,95	0,26	Не обн.	0,5	31,73
21	504-106	38,02	21,74	Не обн.	3,64	2,43	8,4

Номер анализа	Номер образца	Миналы, мол.%				Mg-компоненты	Ca-компоненты
		Спес	Грос	Андр	Ti-Андр		
1	415-7 (9)	0,1	9,35	4,99	0,15	75,19	15,29
2	415-16 (4)	Не обн.	18,89	1,49	Не обн.	34,87	20,39
3	417-89 (15)	"	2,16	0,50	"	53,63	2,66
4	415-14,17 (6)	"	4,20	Не обн.	"	43,50	4,2
5	415-12 (6)	"	3,82	"	"	29,25	3,82
6	415-12 (9)	"	3,5	"	"	27,51	3,5
7	477-14 (3)	2,69	4,78	"	"	31,79	4,78
8	415-14,17 (1)	7,69	2,43	8,34	"	12,13	10,77
9	475-1 (7)	11,07	6,27	Не обн.	"	0,17	6,27
10	417-8,9 (11)	1,25	21,08	7,6	"	27,50	28,68
11	477-1,4 (8)	0,58	28,90	1,7	"	11,60	30,6
12	477-1,4 (1)	0,57	24,17	Не обн.	"	0,30	24,17
13	477-1,4 (2)	0,80	22,99	"	"	0,40	22,99
14	445-9 (6)	18,05	6,15	"	"	12,29	6,17
15	514-81	Не обн.	11,2	14,9	2,6	40,1	28,7
16	438-120	"	9,7	28,26	1,92	47,68	39,88
17	418-306	"	7,09	32,03	2,4	47,14	41,52
18	502-110	"	71,97	Не обн.	Не обн.	0,31	71,97
19	504-115	0,68	33,1	41,53	0,92	0,04	75,55
20	502-138	Не обн.	17,03	76,98	0,83	2,06	94,84
21	504-106	8,11	23,93	Не обн.	Не обн.	9,76	23,95

Примечание. *Пи* — пироп; *Альм* — альмандин; *Спес* — спессартин; *Грос* — гроссуляр; *Андр* — андрадит; *Ti-Андр* — Ti-андрадит; *Увар* — уваровит. Анализы 1-14 соответствуют гранатам из концентрата, 15-21 — из ксенолитов гранатосодержащих пород; 15-17 — сильно измененные гранаты. В табл. 2 и 3 уваровитовый и кюрингитовый миналы не обнаружены; для удобства используется сквозная порядковая нумерация анализов.

Оксиды, мас. %					Миналы, мол. %	
FeO	Cr ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Σ	Пи	Альм
6,17	3,12	0,08	He обн.	100,23	75,19	9,35
21,36	He обн.	He обн.	"	98,56	34,87	45,45
21,62	"	"	"	100,12	52,63	44,63
24,40	"	"	"	99,03	43,50	52,70
29,09	"	"	"	100,06	29,25	64,3
29,42	"	"	"	99,75	27,51	65,32
26,42	"	"	"	98,33	31,79	58,85
29,44	"	"	"	99,22	12,13	68,19
33,61	"	"	"	100,18	0,17	80,82
22,46	"	"	"	100,36	27,50	48,48
26,12	"	"	"	98,53	11,60	57,76
30,44	"	"	"	100,4	0,30	71,6
30,48	"	"	"	98,32	0,40	72,41
27,06	"	"	"	99,25	12,29	61,84
15,97	He опр.	0,9	1,3	93,36	40,1	34,5
13,37	"	1,32	0,96	94,58	47,68	10,7
13,70	"	1,12	1,12	93,91	47,14	9,95
11,66	"	He обн.	He обн.	100,81	0,31	26,68
22,69	"	"	0,06	100,87	0,04	23,88
22,73	"	"	0,04	100,07	2,06	1,63
25,51	"	"	He обн.	99,73	9,76	57,16

торое контролировалось суммой катионов; при расчете на миналы — схема, приведенная в работе [14]. Содержание Fe³⁺ устанавливалось дополнением R³⁺ до 2,0, поскольку метод электронно-зондового анализа не позволяет непосредственно анализировать двух- и трехвалентное железо. Наличие Fe³⁺ в гранате подтверждает существование полосы переноса заряда O²⁻ → Fe³⁺ в оптических спектрах.

По химическому составу гранаты из концентрата делятся на две группы: Mn-содержащие и безмарганцовистые гранаты (табл. 2). Среди Mn-содержащих гранатов по количеству Са-компонента выявлены низкокальциевые разновидности (2,19–7,8 мас. % MnO) альмандин-пироп-спессартиновой серии и высококальциевые (до 3,28 мас. % MnO) альмандин-пироп-гроссуляровой серии. Безмарганцовистые гранаты по содержанию Са-компонента относятся к пироп-альмандиновому ряду или гроссуляр-пироп-альмандиновой серии. Особенности химизма гранатов наглядно отражает диаграмма (рис. 7), на которой выделены поля разновидностей гранатов, достаточно хорошо коррелирующие с типами спектров минерала и свидетельствующие о высокой кристаллохимической информативности последних. На ту же диаграмму были нанесены точки составов гранатов из изученных ксенолитов некимберлитового гезизиса (см. табл. 2, ан. 15–21). По соотношению основных компонентов выделяются гроссуляр-альмандиновые (I), андрадит-гроссуляр-альмандиновые (II), андрадит-гроссуляровые (III) и альмандин-гроссуляр-спессартиновые гранаты (V). Гранаты из ксенолитов, отнесенных к IV типу, сильно изменены (см. табл. 2, ан. 15–17). Гранаты подобного состава ранее не отмечались в кимберлитовых телах и могут быть отнесены к скарноподобным породам (I), роговикам (II, III), гранатам из приконтактных зон пегматитов и метаморфических пород — сланцам и амфиболитам (V) [9, 11]. Одна из точек составов гранатов из ксенолитов (V) попала в поле высокомарганцовистых гранатов из концентрата, тем самым позволяя однозначно отнести гранаты подобного состава к метаморфическим.

Т а б л и ц а 3

Состав включений и минерала-хозяина (оранжевых гранатов) по данным электронно-зондового анализа

Номер анализа	Номер образца	Тип породы	Включения	Анализируемый минерал	Оксиды, мас. %				
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	MgO
22	477-1a (1)	Магнезиально-железистые эклогиты	Ильменит и титаномagnetит (структуры распада)	Гранат	38,1	22,49	Не обн.	0,45	8,38
				Ильменит			0,09	47,81	9,59
				Титаномagnetит		0,22	8,85	0,18	
23	417-32, 33 (2)	То же	Ильменит, титаномagnetит	Гранат	39,87	23,49		0,79	10,19
				Ильменит			0,03	48,42	2,08
				Титаномagnetит		0,08	21,87	2,24	
24	477-4 (9)	"	Биотит, циркон	Гранат	40,69	23,27			11,04
				Биотит	41,04	14,69	5,71		15,84
25	415-1 (5)	"	Темноокрашенный кварц, циркон	Гранат	38,73	22,16			10,85
26	477-1a (4)	"	Рутил	Гранат Рутил	37,81	22,88			6,91
27	417-32, 33 (1)	Гранаты некимберлитового генезиса	Пластинчатые выделения ильменита и циркона	Гранат	38,57	21,96		0,95	5,49
				Ильменит		0,76	50,08	1,53	
28	415-1, 2 (7)	То же	Кварц, биотит, ксенолит, ильменит	Гранат	36,34	22,1		0,82	5,49
				Ильменит		0,03	50,82	0,37	1,1
29	415-1, 2 (3)	"	Ильменит	Гранат	38,45	21,85		0,32	1,87
				Ильменит		0,07	47,9	0,39	
30	415-1, 2 (4)	"	Биотит	Гранат	39,45	19,64		1,09	5,96
				Биотит	35,96	15,6	3,02	0,01	13,9
31	477-4 (1)	Гранаты некимберлитового генезиса	Ильменит, кварц	Гранат	37,15	22,39	0,07	1,4	5,28
				Ильменит		0,1	48,07	0,5	0,05
32	477-1a (5)	То же	Рутил, апатит, кварц	Гранат Рутил	41,08	21,16		4,17	2,07
33	477-1a (10)	"	Кварц, ильменит с биотитом	Гранат	39,37	21,77		3,18	2,07
				Биотит	35,18	14,3	2,2	0,01	14,67
34	477-1a (3)	"	Кварц, сульфидная фаза	Гранат	38,81	22,83		6,99	2,69
35	477-1a (7)	"	Кварц, ильменит, Nb-ильменорутит, циркон в нем	Гранат	39,79	22,56		0,22	4,1
				Ильменит			51,0	2,96	
36	477-1a(5)	"	Кварц	Гранат	38,13	21,44		0,05	3,86

Оксиды, мас.%					Миналы, мол.%					
СаО	FeO	Na ₂ O	K ₂ O	Σ	Пи	Альм	Спес	Грос	Андр	Ti-андр
4,77	24,57	Не обн.	0,03	98,78	32,42	53,35	0,99	13,24	—	—
Не опр.	49,21			98,07						
	88,71			97,97						
4,08	23,12		0,03	101,6	37,82	47,8	1,64	11,91	—	—
	47,99			98,52						
	71,69			93,78						
2,18	23,32		0,03	100,5	43,25	51,02	—	6,27	—	—
2,33	6,72		11,27	95,48						
2,69	24,51	0,02	0,02	98,97	41,23	52,44	—	5,88	1,5	—
9,1	22,06	0,03	0,05	98,86	26,75	47,92	—	25,33	—	—
0,04	4,49			102,22						
2,87	30,04		0,05	98,86	24,98	67,63	2,14	8,25	—	—
	45,31			98,39						
1,44	33,77		0,02	100,5	22,73	72,24	1,08	3,95	—	—
	46,32	0,01		98,66						
6,8	31,32		0,03	100,64	7,54	70,11	0,68	19,8	—	—
	49,87			98,23						
2,28	29,54		0,01	98,55	23,4	69,59	2,57	7,89	—	—
0,002	13,8	0,31	9,7	93,24						
7,65	24,03	0,02	0,04	98,38	21,76	53,94	3,44	19,34	2,04	0,42
	49,6			98,38						
5,37	27,3	0,05	0,03	98,86	9,46	62,82	10,33	16,64	—	—
	4,3			98,04						
4,36	27,45	0,04	0,01	98,29	9,23	68,74	8,06	13,97	—	—
0,08	14,8	0,1	7,96	89,96						
2,2	24,35		0,03	98,5	13,64	59,78	17,32	7,5	—	—
2,42	29,16			98,3	18,74	67,77	0,47	7,37	—	—
	46,85			98,17						
15,06	20,03	0,02	0,03	98,61	15,02	42,68	0,1	40,68	0,54	—

Минеральные включения

Тенденции, аналогичные изменениям соотношения основных компонентов в гранатах из концентрата, выявлены при химическом анализе гранатов с включениями. Для исследований было предварительно отобрано 112 зерен гранатов с включениями. Практически все зерна гранатов содержат многочисленные включения, часто различающиеся в пределах одного зерна по форме выделения, размеру и цвету. Выделены следующие группы включений: изометричные или слабо удлинённые и игольчатые, которые в свою очередь были разделены по цвету на темноокрашенные, бесцветные и черные с последующим установлением высокоотражающих и низкоотражающих.

Для электронно-зондового анализа отобраны гранаты с включениями из различных цветовых групп минерала. При этом достигалось по возможности максимальное разнообразие содержащихся в них включений. Всего было проанализировано 15 зерен гранатов с включениями (по 2–4 зерна из каждой цветовой группы гранатов). Химический состав гранатов и включений в них представлен в табл. 3. На треугольную диаграмму Ca–Mg–(Fe + Mn) (см. рис. 7) нанесены точки составов гранатов с включениями и путем незначительной корректировки ранее выделенных полей выделены общие поля с составами минерала из концентрата, что подтверждает правильность предварительного разделения и позволяет установить минеральные ассоциации гранатов каждой из групп.

Таким образом, на диаграмме Ca–Mg–(Fe + Mn) (см. рис. 7) выделяются следующие поля составов гранатов, подтвержденные оптико-колориметрическим анализом: *I* – поле составов гранатов из магнезиально-железистых эклогитов. Содержание Ca-компоненты в них в поле *I* меняется от 7 до 25 мол.%, содержание Mg-компоненты колеблется от 25 до 45 мол.%. Среди включений в них отмечены структуры распада ильменит–титаномагнетит, биотит, циркон, кварц и рутил (что отличает эти породы от магнезиально-железистых эклогитов в якутских кимберлитовых трубках); *II* – поле составов гранатов некимберлитового генезиса по содержанию MnO делится в свою очередь на 2: безмарганцовистых и низкомарганцовистых гранатов (*IIa*) и высокомарганцовистых с содержаниями MnO до 7,8 мас.% (*IIб*). В пользу отнесения гранатов поля *IIб* к некимберлитовым, метаморфическим свидетельствует факт попадания в это поле точки граната из ксенолита (обр. 504-106). В качестве включений в этих гранатах обнаружены ильменит, биотит, кварц и сульфидная фаза. Гранаты поля *IIa* до сих пор не описаны в кимберлитах [7, 16]. По соотношению основных компонентов (Mg – от 20 до 53 мол.%, Fe – от 46 до 75 мол.%, Ca-компонента – от 1 до 20 мол.%), невысокой по интенсивности полосе переноса заряда на оптических спектрах, набору включений их следует также отнести к группе гранатов некимберлитового генезиса. Среди включений в них отмечены пластинчатые выделения ильменита, циркона, кварца, ксенотима, биотита и Nb-ильменорутила, содержащего (в мас.%): Nb₂O₅ – 22,93; TiO₂ – 55,75; Al₂O₃ – 0,21; MnO – 0,11; FeO – 9,05; Ta₂O₅ – 13,45. т.е. данное протогенетическое включение характеризуется ассоциацией, подобной карбонатитовой.

Гранаты альмандин-гроссулярного состава (точки 12 и 13 на рис. 7), по-видимому, связаны с вулканогенными породами, гранаты подобного состава содержатся в дацитах и липарито-дацитах [9]. А гранаты с составами, подобными отмеченным точками 11 и 36 на рис. 7, обнаружены в альмандиновых эклогитах [16]. Вероятно, столь широкие колебания составов гранатов связаны со значительной гетерогенностью материала диатермы.

Гранаты магнезиально-железистых эклогитов из поля *I* характеризуются типом спектра Г, гранаты поля *IIa* имеют спектр типов А и Е, реже – Б, а в поле гранатов *IIб* попали точки гранатов с типами спектра Д.

Проведенное комплексное исследование гранатов оранжевой окраски, включающее последовательное изучение морфологических особенностей, оптических спектров,

химического анализа минерала-хозяина и включений в нем, позволило, во-первых, охарактеризовать большую группу образцов, а во-вторых, предложить рациональную комплексную методику их исследования, в основе которой лежит оптико-колориметрический метод, позволяющий проводить экспрессную отбраковку гранатов некимберлитового генезиса. Таким образом, в результате комплексного подхода к изучению гранатов оранжевой окраски одного из кимберлитовых тел СССР установлено следующее.

1. Среди гранатов оранжевой окраски преобладают две главные генетические группы: гранаты магнезиально-железистых эклогитов и гранаты некимберлитового генезиса.

2. Среди исследованных зерен гранатов оранжевой окраски не обнаружено гранатов из алмазных парагенезисов, что с учетом единичных находок оранжевых гранатов как включений в алмазе из изученной кимберлитовой трубки указывает на ограниченную распространенность в ней алмаза эклогитового парагенезиса. Поиски и оценку продуктивности тел района следует проводить с учетом этого обстоятельства.

3. Гранаты некимберлитового генезиса среди группы гранатов оранжевой окраски имеют преимущественное распространение, что является характерной особенностью изученной кимберлитовой трубки и связано, возможно, с резким преобладанием ксенолитов гранатсодержащих пород корового происхождения.

4. Гранаты эклогитового генезиса могут быть надежно определены посредством экспрессного метода оптической спектроскопии при ограниченном объеме более дорогостоящих электронно-зондовых анализов для проведения контрольных измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Афанасьев В.П., Харьков А.Д., Соколов В.Н.* Морфология и морфогенез гранатов из кимберлитов Якутии // Геология и геофизика. 1979. № 3. С. 88–99.
2. *Афанасьев В.П.* Генезис пирамидально-черепачатого рельефа растворения на гранатах пироп-альмандинового ряда // Зап. ВМО. 1985. Ч. 114, вып. 1. С. 73–80.
3. *Бахтин А.И.* Породообразующие силикаты: оптические спектры, кристаллохимия, закономерности окраски, типоморфизм. Казань: Изд-во КГУ, 1985. 192 с.
4. *Гаранин В.К., Кудряцева Г.П., Посухова Т.В.* и др. Особенности морфологии и внутреннего строения ильменита из кимберлитовых тел Мало-Ботуобинского района Якутии // Вестн. МГУ, Сер. 4. 1984. № 6. С. 17–35.
5. *Гужий Д.В., Ткачук Л.Т.* О ступенчатой (черепачатой) форме гранатов // Минерал. сб. Львов. геол. о-ва. 1959. № 13. С. 65–73.
6. *Дюсон Дж.* Кимберлиты и ксенолиты в них. М.: Мир, 1983. 300 с.
7. *Екимова Т.Е.* Новые данные по минералогии рутиловых эклогитов из кимберлитовых трубок Якутии // Вестн. МГУ, Сер. 4. 1979. № 2. С. 88–89.
8. *Мацюк С.С., Платонов А.И., Хоменко В.М.* Оптические спектры поглощения и окраска мантийных минералов. Киев: Наук. думка, 1985. 246 с.
9. Минералы: Справочник. М.: Недра, 1972. Т. 111, вып. 1. 882 с.
10. *Платонов А.И.* Природа окраски минералов. Киев: Наук. думка, 1976. 264 с.
11. *Перчук Л.Л.* Сосуществующие минералы. Л.: Недра, 1971. 424 с.
12. *Сироштан Р.И., Половко Н.И., Парфенова А.Я.* и др. Гранаты высокометаморфизованных железистых пород Украинского щита // Минерал. журн. 1980. Т. 2, № 1. С. 53–69.
13. *Соболев Н.В.* Парагенетические типы гранатов. М.: Наука, 1964. 218 с.
14. *Соболев Н.В.* Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1984. 263 с.
15. *Таран М.И., Платонов А.И., Польшин Э.В.* Окраска ювелирных гранатов из месторождений СССР // Конституция и свойства минералов. 1978. Вып. 12. С. 88–103.
16. *Удовкина Н.Т.* Эклогиты СССР. М.: Наука, 1985. 285 с.
17. *Францессон Е.В.* Природа скульптурированных поверхностей на минералах кимберлитов // Вестн. МГУ, Сер. 4. Геология. 1964. № 5. С. 55–61.
18. *Bull P.A.* Glacial deposits identified by chat-termark trails in detrital garnets // Comment. Geol. 1977. Vol. 5. P. 248.
19. *Folk R.H.* Glacial deposits identified by chat-termark trails in detrital garnets // Geology. 1975. Vol. 3. P. 473–475.