

РЕЗВУХИН Дмитрий Иванович

**ГРАНАТЫ С МИНЕРАЛЬНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ ОКСИДОВ И
СУЛЬФИДОВ ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ
ИНТЕРНАЦИОНАЛЬНАЯ: МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И СВЯЗЬ С
ПРОЦЕССАМИ МАНТИЙНОГО МЕТАСОМАТОЗА В ЛИТОСФЕРНОЙ
МАНТИИ МИРНИНСКОГО ПОЛЯ, СИБИРСКИЙ КРАТОН**

25.00.05 – «минералогия, кристаллография»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

НОВОСИБИРСК – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН)

Научный руководитель:

Мальковец Владимир Григорьевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории минералов высоких давлений и алмазных месторождений (№451) ИГМ СО РАН

Официальные оппоненты:

Гаранин Виктор Константинович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик РАЕН, научный руководитель минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН

Костровицкий Сергей Иванович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры СО РАН

Защита состоится 2 марта 2017 г. в 13-00 на заседании диссертационного совета Д 003.067.02 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения РАН (в конференц-зале).

Адрес: 630090, г. Новосибирск, просп. ак. Коптюга, 3

Факс: 8 (383) 333-21-30, 333-27-92

e-mail: gaskova@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГМ СО РАН и на сайте <http://www.igm.nsc.ru> в разделе “Образование”.

Автореферат разослан 12 января 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д.Г.-М.Н.

О.Л. Гаськова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Изучение строения, состава и эволюции субконтинентальной литосферной мантии (СКЛМ) является одной из важнейших задач мантийной петрологии. Кимберлитовые и лампроитовые магмы выносят на поверхность широкий набор мантийных ксенолитов и ксенокристаллов, которые предоставляют прямую информацию о составе наиболее глубоких частей литосферной мантии. Хромсодержащий пироп является одним из породообразующих минералов перидотитов литосферной мантии Земли. Пироп с содержанием Cr_2O_3 более 5 мас.%, наряду с хромитом и пикроильменитом, является одним из главных минералов-индикаторов при поисках новых кимберлитовых трубок и кимберлитовых полей (Соболев и др., 1969; Sobolev et al., 1973). В работах Н.В. Соболева была предсказана (Соболев и др., 1969), а впоследствии и доказана (Sobolev et al., 1973) положительная корреляция содержания высокохромистых субкальциевых пиропов с содержанием алмаза в кимберлитовых трубках. В настоящее время общепризнанным является метасоматический генезис алмазов в литосферной мантии древних кратонов (Stachel, Harris, 2008). Метасоматические модели были также предложены и для генезиса высокохромистых пиропов (Stachel et al., 2004; Malkovets et al., 2007; O'Reilly, Griffin, 2013; Shu, Brey, 2015).

Начиная с конца 60-х годов 20 века изучению минеральных включений в алмазах уделялось пристальное внимание (см. обзор в Stachel, Harris, 2008). На основании полученных данных был достигнут значительный прогресс в понимании процессов, связанных с генезисом алмаза. Однако работы, посвященные изучению минеральных включений в мантийных гранатах, немногочисленны и представляют собой в основном только минералогическое описание находок (Бобриевич и др., 1959, 1964; Bauer, 1966; McGetchin, Silver, 1970; Griffin et al., 1971; Вахрушев, Соболев, 1971; Соболев, 1974; Костровицкий, Гаранин, 1992; Костровицкий и др., 1993; Варламов и др., 1993, 1995; Wang et al., 1999; Афанасьев и др., 2001; Vrana, 2008; Alifirova et al., 2012; Ziberna et al., 2013). Результаты этих исследований показали наличие в виде включений достаточно редких высокотитанистых минералов-оксидов, таких как рутил, пикроильменит, армалколит, шриланкит, минералы группы кричтонита, которые нехарактерны для первичного парагенезиса деплетированных перидотитов, почти не встречаются в неметасоматизированных перидотитовых ксенолитах и зачастую характеризуются необычным химическим составом с повышенной концентрацией редких и несовместимых элементов. Минеральные включения такого состава являются ценным источником информации о характере процессов, отвечающих за образование пиропов в глубинной литосферной мантии. В концентрате тяжелой фракции кимберлитовой трубки Интернациональная (Мирнское поле, Сибирский кратон), которая является уникальным месторождением природных алмазов (8,53 карата на тонну), распространены гранаты с включениями оксидов и сульфидов. Детальное минералогическое и геохимическое изучение включений и вмещающих гранатов позволит лучше понять генезис пироба в литосферной мантии древних

платформ, который в настоящее время остается дискуссионным, а также сделать рекомендации по использованию полученных результатов в практике алмазописковых работ.

Цель исследования – комплексное изучение гранатов с минеральными включениями оксидов и сульфидов из кимберлитов трубки Интернациональная и интерпретация полученных данных для установления генезиса изученных гранатов.

Задачи исследования: 1) провести отбор гранатов с минеральными включениями; 2) провести диагностику минеральных включений и исследовать их химический состав; 3) определить химический состав вмещающих гранатов; 4) определить редкоэлементный состав вмещающих гранатов; 5) провести U-Pb датирование крупных включений рутила; 6) установить генезис гранатов и P-T параметры их образования.

Объект исследования – ксенокристаллы граната перидотитового (хромистый пироп) и эклогитового парагенезисов из концентрата тяжелой фракции трубки Интернациональная и включения оксидов и сульфидов.

Фактический материал и личный вклад автора

Идентификация и изучение химического состава и внутреннего строения гранатов и их минеральных включений были выполнены на современной высокоточной аппаратуре в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева, Новосибирск, Россия), в Институте изучения земных недр (Institute for the Study of the Earth's Interior), Университет Окаямы, Мисаса, Япония, и в Национальном ключевом центре Австралийского совета по научным исследованиям "Флюидные системы от ядра к коре"/"Геохимическая эволюция и металлогения континентов" (CCFS/GEMOC ARC National Key Centre), Университет Маккуори, Сидней, Австралия.

Целые зерна гранатов размером от 1 до 4 мм из концентрата тяжелой фракции трубки Интернациональная в количестве более 6000 шт. были предоставлены для исследований д.г.-м.н. А.Д. Харьковым. В работе использована представительная коллекция из 199 зерен гранатов, большую часть которых автор отобрал из концентрата самостоятельно. Основным критерием при отборе образцов являлось наличие в гранатах крупных включений, пригодных для исследования с использованием методов сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. Все 199 образцов были имплантированы в шашки из эпоксидной смолы и впоследствии выведены на поверхность для последующих аналитических исследований. Диссертантом лично было выполнено более 2000 микрозондовых определений состава гранатов и включений, более 300 определений редкоэлементного состава гранатов с использованием ионного зонда SIMS 5f, получено более 500 изображений в обратно-рассеянных электронах, сделано 5 поэлементных карт для негомогенных гранатов. Данные по редкоэлементному составу гранатов и U-Pb датированию включений рутила получены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой с лазерной абляцией (LA-ICPMS) к.г.-м.н. В.Г. Мальковцом, д.г.-м.н. Е.А.

Белоусовой и к.г.-м.н. И.Г. Третьяковой в Национальном ключевом центре Австралийского совета по научным исследованиям “Геохимическая эволюция и металлогения континентов” (GEMOC) (Университет Маккуори, Сидней, Австралия).

Научная новизна

1) Проведено комплексное изучение химического и редкоэлементного составов гранатов и химического состава включений оксидов и сульфидов из кимберлитового тела (трубка Интернациональная) в пределах Сибирского кратона;

2) Установлено максимальное содержание Cr_2O_3 в рутиле (9,75 мас.%) среди всех ранее описанных в литературе;

3) На основе изучения коллекции образцов, а также с использованием мировых литературных данных о химическом составе рутила, показано, что содержание Cr_2O_3 в рутиле $> 1,7$ мас.% свидетельствует о происхождении такого рутила в условиях кратонной перидотитовой литосферной мантии;

4) Установлено, что состав включений минералов группы кричтонита (общая формула $\text{ABC}_{18}\text{T}_2\text{O}_{38}$) в изученных гранатах существенно отличается от состава типичных для литосферной мантии кратона Каапвааль минералов серии LIMA (линдслейит – матиасит), широко описанных в ксенолитах из кимберлитов ЮАР. В гранатах обнаружены включения минерала из группы кричтонита, не утвержденного ранее в списке IMA, характеризующегося доминированием Sr в позиции A и Fe в позиции B;

5) Установлена прямая корреляция между содержанием хрома во включениях высокотитанистых оксидов (рутил, пикроильменит, минералы группы кричтонита) и вмещающих хромистых гранатах;

6) Показано, что возраст включений рутила в гранатах по данным U-Pb датирования отражает время внедрения кимберлитовой магмы трубки Интернациональная (~360 млн лет);

7) Впервые получены данные о вертикальной гетерогенности мантийной колонны под кимберлитовой трубкой Интернациональная на основе различий в химическом составе и температуре образования гранатов с включениями оксидов и сульфидов;

8) Впервые описаны негомогенные ксенокристаллы граната из кимберлитовой трубки Интернациональная с ярко-выраженной зональностью по главным и редким элементам. Установлены экстремально высокие содержания ряда редких элементов в краевой части зерен двух негомогенных гранатов.

Научная (теоретическая) значимость

1) Обнаружены несомненные свидетельства метасоматического генезиса, по крайней мере, части гранатов перидотитового парагенезиса в литосферной мантии Мирнинского поля;

2) Установление вертикальной мантийной гетерогенности под кимберлитовой трубкой Интернациональная важно для понимания факторов, отвечающих за алмазоносность конкретного кимберлитового тела (трубка Интернациональная), а также за контрастную алмазоносность других

кимберлитовых тел в пределах Мирнинского поля (трубки Мир, Спутник, им. XXIII съезда КПСС, Тасжная, Амакинская, Дачная);

3) Результаты работы имеют значение для развития представлений о процессах преобразования вещества литосферной мантии и вносят существенный вклад в изучение процессов мантийного метасоматического обогащения в литосферной мантии Сибирского кратона;

4) Данные о химическом составе включений потенциально нового минерального вида группы кричтонита расширяют мировые знания о составах минералов этой группы.

Практическая значимость

Результаты исследования включений хромистого рутила в гранатах могут быть использованы в практике алмазопроискоковых работ на территории древних кратонов.

Соответствие результатов работы научным специальностям

Результаты работы соответствуют пункту 2 (минералогия земной коры и мантии Земли, ее поверхности и дна океанов) паспорта специальности 25.00.05.

Публикации и апробация работы

По теме диссертации опубликовано 3 статьи в российских и зарубежных рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК. Отдельные положения работы представлялись автором на VI Международной Сибирской конференции молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, Россия, 2012), 10-й Международной кимберлитовой конференции (Бангалор, Индия, 2012), III Международной конференции "Кристаллогенезис и Минералогия" (Новосибирск, 2013), 26 Гольдшмидтской Международной конференции (Йокогама, Япония, 2016).

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 8 глав и заключения общим объемом 173 страницы. В ней содержится 69 рисунков, 4 таблицы и 5 приложений. Список литературы включает 187 наименований.

Во введении определены цели и задачи исследования, дана общая характеристика работы, сформулированы защищаемые положения. В первой главе приводится литературный обзор состава, строения и возраста континентальной литосферы, характера процессов, модифицирующих СКЛМ, а также сделан обзор находок высокотитанистых оксидов в литосферной мантии, в том числе и в виде включений в пиропсах. Во второй главе рассмотрены геологическая характеристика района исследований, состав и строение трубки Интернациональная, особенности ксеногенного материала из трубки Интернациональная и других кимберлитовых тел Мирнинского поля. В третьей главе описаны методы исследования, использованные в работе. В главах с четвертой по седьмую изложены результаты исследования: минералогическая характеристика и классификация образцов, химический состав гранатов и включений, редкоэлементный состав гранатов и U-Pb датирование включений рутила. В восьмой главе обсуждаются полученные результаты, и приводится их интерпретация. В заключении кратко освещаются основные выводы.

Благодарности

Работа выполнена в лаборатории минералов высоких давлений и алмазных месторождений (№451) ИГМ СО РАН им. В.С. Соболева под руководством к.г.-м.н. Мальковца В.Г., которому автор выражает свою глубокую признательность. Данное исследование стало возможным благодаря наличию большой коллекции гранатов, предоставленной д.г.-м.н. А.Д. Харьковим, к скрупулёзной работе которого автор относится с благодарностью и уважением. Автор благодарен академику РАН д.г.-м.н. Н.В. Соболеву, академику РАН д.г.-м.н. Н.П. Похиленко, д.г.-м.н. Д.А. Зедгенизову, д.г.-м.н. Ю.Н. Пальянову, к.г.-м.н. И.С. Шарыгину, к.г.-м.н. Т.А. Алифировой, к.г.-м.н. А.А. Гибшер и профессору У. Гриффину (CCFS/GEMOC, Университет Маккуори, Сидней, Австралия) за обсуждение результатов исследования и ценные советы. Диссертант благодарит зав. лабораторией №451 д.г.-м.н. А.В. Корсакова за критический анализ рукописи и важные замечания, профессоров У. Гриффина и С. О'Рейлли за финансовую поддержку при проведении геохимических исследований в Центре CCFS/GEMOC (Университет Маккуори, Сидней, Австралия), к.г.-м.н. В.Г. Мальковца, д.г.-м.н. Е.А. Белоусову, д.г.-м.н. К.Д. Литасова, к.г.-м.н. И.Г. Третьякову за полученные аналитические данные, к.г.-м.н. Л.В. Усову за помощь при проведении микронзондовых анализов. На различных этапах работы неоценимую поддержку автору оказали м.н.с. Д.С. Михайленко и инж. О.В. Щепетова. Автор признателен сотрудникам лаборатории Pheasant Memorial Laboratory в Институте изучения земных недр (Institute For The Study Of The Earth's Interior), Мисаса, Япония, в особенности директору института Эйзо Накамура, обеспечившему возможность работы и доступ к аналитическому центру, а также Татсуки Тсуджимори, Ота Цутому и Таку Кунихиро за содействие в подготовке образцов и проведении аналитических исследований.

Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ лаборатории № 451 ИГМ СО РАН и при финансовой поддержке грантами РФФИ (12-05-31116; 12-05-31411; 12-05-33035; 13-05-01051; 16-05-01079; 16-05-01052), Президента РФ (МК 2689.2013.5; МК-4534.2016.5), Министерства образования и науки Российской Федерации (№14.В25.31.0032) и компании ОПТЭК.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение. *В перидотитовых гранатах из трубки Интернациональная установлены включения рутила, обогащенного высокозарядными элементами (до 15,57 мас.% Nb₂O₅), пикроильменита, Fe-Ti-Cr шпинели, минералов группы крйтонита, обогащенных крупноионными литофильными (Ba, Sr), высокозарядными (Zr) и редкоземельными элементами (La, Ce и др.), а также хромита и сульфидов. В эклогитовых гранатах обнаружены включения рутила и пикроильменита. Минеральная ассоциация обогащенных редкими и несовместимыми элементами высокотитанистых оксидов свидетельствует о метасоматическом генезисе вмещающих перидотитовых гранатов.*

Минеральные включения оксидов в изученных гранатах обычно представлены в виде удлиненных, игольчатых образований с округлым или

полигональным сечением, также распространены лейсты, таблитчатые включения, призмы с различной огранкой. Количество включений оксидов во вмещающих гранатах сильно варьирует; встречаются как единичные иглы/лейсты, так и до нескольких десятков в некоторых образцах. Диаметр проанализированных включений составляет 10-200 мкм. В исследованных перидотитовых гранатах были выявлены следующие парагенезисы минеральных включений (в скобках количество образцов): рутил (24), пикроильменит (5), минералы группы кричтонита (17), шпинель (27); рутил + пикроильменит (8), рутил + минерал группы кричтонита (4), рутил + шпинель (2), рутил + ильменит + минерал группы кричтонита (1), минерал группы кричтонита + шпинель (1), минерал группы кричтонита + пикроильменит (1). В десяти низкохромистых ($\text{Cr}_2\text{O}_3 < 0,16$ мас.%) эклогитовых гранатах были обнаружены включения пикроильменита и еще в двух – включения рутила.

Исследованные включения *рутила* в 39 гранатах перидотитового парагенезиса характеризуются необычно высокими содержаниями примесей, которые в сумме достигают 27 мас. % (Рис. 1). Наиболее характерны Cr_2O_3 (до 9,75 мас.%) и высокочargedные элементы: Nb_2O_5 (до 15,57 мас.%), Ta_2O_5 (до 1,73

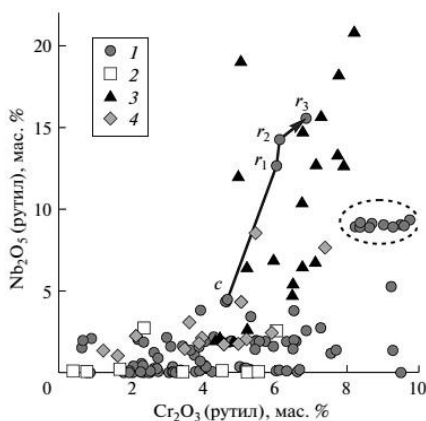


Рис. 1. Химический состав включений рутила на диаграмме Cr_2O_3 – Nb_2O_5 : 1–включения рутила в пирропах из трубки Интернациональная; 2–включения рутила в пирропах из дайатремы Гарнет Ридж (Wang et al., 1999); 3–рутил в крупных метасоматических нодулах из кимберлитов трубки Орапа, Ботсвана (Tollo, Haggerty, 1987); 4–рутил из ксеногенного материала кимберлитов ЮАР (Jones et al., 1982; Schulze, 1990; Haggerty, 1991; Konzett et al., 2013). Пунктирной линией обведены точки составов включений рутила из обр. INT-5. Стрелка соединяет точки составов центра (с) и края (r_1 , r_2 , r_3) включения рутила из обр. INT-335.

мас.%) и ZrO_2 (до 0,76 мас.%). Содержание примесей во включениях рутила в двух эклогитовых гранатах существенно ниже, чем во включениях рутила в перидотитовых гранатах: содержание TiO_2 в них составляет от 96,9 до 99,7 мас.%; Cr_2O_3 0,06 – 0,14 мас.%, Nb_2O_5 до 0,06 мас. %.

Минералы группы кричтонита – это сложные оксиды (титанаты) с общей формулой $\text{ABC}_{18}\text{T}_2\text{O}_{38}$. Выделение минеральных видов внутри группы основано на преобладающих катионах в позициях А и В. Большинство изученных минералов группы кричтонита из литосферной мантии древних кратонов представлены минералами серии LIMA (линдслейит–матисит, члены группы с Ва и К в виде доминирующих катионов позиции А, соответственно), которые широко описаны в ксеногенном материале кимберлитов ЮАР (Jones et al., 1982; Haggerty et al., 1983; Tollo, Haggerty, 1987; Haggerty, 1991; Konzett et al., 2013). Особый интерес представляет находка включений минерала группы кричтонита в гранатах из трубки Интернациональная, обогащенного Sr в позиции А и Fe в позиции В. Другие обнаруженные в ходе исследования минеральные виды группы кричтонита представлены лаверингитом и ліндслейитом. По содержанию главных элементов (Ti, Fe, Mg, Cr) в позициях В, С, Т, на которых

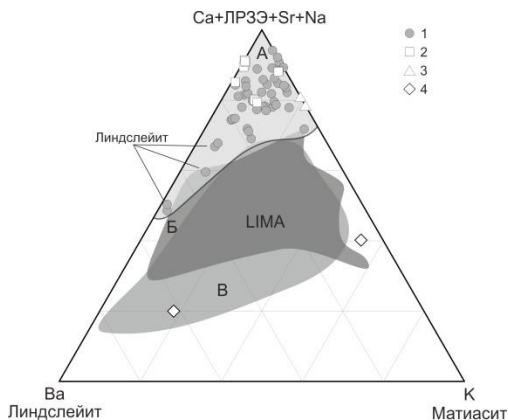


Рис. 2. Химический состав минералов группы кричтонита на тройной диаграмме Ba–K–Ca+LP33+Sr+Na (мол.%). 1–включения в пирропах из трубки Интернациональная; 2–включения в пирропах из диатремы Гарнет Ридж (Wang et al., 1999); 3– включение в пирропе Чешского массива (Vrana, 2008); 4– включения в алмазах Сибирского кратона (Соболев и др., 1988; Sobolev et al., 1997). Оконтурированы составы минералов группы кричтонита: А – включения в хромистых пирропах (данная работа; Wang et al., 1999; Vrana, 2008), Б – минералы LIMA из концентрата кимберлитов ЮАР (Haggerty, 1991), В – минералы LIMA из ксенолита шпиннелевого гарцбургита из отвалов Бошоф Род, провинция Каапвааль, ЮАР (Konzett et al., 2013). Для включений минералов группы кричтонита в алмазах (Соболев и др., 1988; Sobolev et al., 1997) содержание Na₂O не определялось.

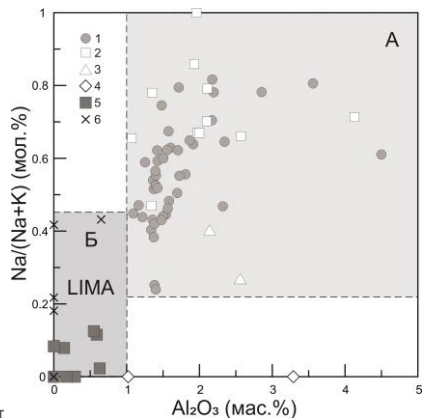


Рис. 3. Химический состав минералов группы кричтонита на диаграмме Al₂O₃ (мас.%) – Na/(Na + K) (мол.%). 1– включения в пирропах из трубки Интернациональная; 2– включения в пирропах из диатремы Гарнет Ридж (Wang et al., 1999); 3– включение в пирропе Чешского массива (Vrana, 2008); 4– включения в алмазах Сибирского кратона (Соболев и др., 1988; Sobolev et al., 1997); 5–минералы LIMA из концентрата кимберлитов ЮАР (Haggerty, 1991); 6–минералы LIMA из ксенолита шпиннелевого гарцбургита из отвалов Бошоф Род, провинция Каапвааль, ЮАР (Konzett et al., 2013). Оконтурированы составы минералов группы кричтонита: А – включения в хромистых пирропах, Б – минералы LIMA из ЮАР. Для включений минералов группы кричтонита в алмазах (Соболев и др., 1988; Sobolev et al., 1997) содержание Na₂O не определялось.

приходится в сумме 18–21 ф.е., минералы LIMA и изученные минералы группы кричтонита в гранатах, в том числе и необычный SrFe-минерал, весьма близки. Основные отличия заключаются в разной концентрации элементов в позициях А и В (Рис. 2), а также в содержании Al₂O₃. У минералов группы кричтонита в гранатах содержание Al₂O₃ > 1 мас.% и достигает 4,5 мас.%; напротив, в минералах серии LIMA из ЮАР концентрация Al₂O₃ < 1 мас.% (Рис. 3). SrFe минерал ранее не был описан в литературе, и, на основе полученных результатов, возможно выделение нового минерального вида группы кричтонита, стабильного в условиях литосферной мантии.

Содержание TiO₂ в исследованных включениях *пикроильменита* составляет от 47,9 до 58,8 мас.%, FeO (общ.) от 23,5 до 42,3 мас.%, MgO от 6,1 до 17,4 мас.%. Главное отличие между включениями *пикроильменита* в перидотитовых и эклогитовых гранатах состоит в содержании Sr: *пикроильменит* ультраосновного парагенезиса более хромистый и может содержать до 5,7 мас.% Cr₂O₃ в форме эсколаитового компонента, в то время как максимальное содержание Cr₂O₃ в *пикроильмените* в эклогитовых гранатах составляет 0,18 мас.%.

Включения *хромшпинелида* в химически однородных гранатах характеризуются преобладанием хромитового компонента (Cr₂O₃ от 45,0 до 60,5

мас.%). Во внешней кайме негомогенных гранатов (см. обоснование четвертого защищаемого положения) установлены включения необычного Fe-Ti-Cr шпинелида с высоким содержанием Fe_2O_3 (до 35 мас.%) и TiO_2 (до 4,9 мас.%).

Для включений высокотитанистых оксидов (рутил, минералы группы кричтонита, пикроильменит) в перидотитовых гранатах характерно повышенное содержание Cr_2O_3 , которое положительно коррелирует с хромистостью вмещающего граната (Рис. 4).

Включения *сульфидов* представлены сферическими образованиями либо с негативной огранкой граната. Каждое включение состоит из смеси продуктов распада моносulfидного твердого раствора (MSS), окруженной прерывистой (или непрерывной) каймой из халькопирита.

Генезис рутила в мантийных перидотитах, особенно в ассоциации с минералами группы кричтонита, традиционно связывают с процессами мантийного метасоматоза (Tollo, Haggerty, 1987; Haggerty, 1991; Sobolev, Yefimova, 2000; Litasov et al., 2006; Konzett et al., 2013). В СКЛМ минералы группы кричтонита, являющиеся важным концентратором редких и несовместимых элементов, имеют несомненный метасоматический генезис (Jones et al., 1982; Haggerty et al., 1983; Haggerty, 1991; Sobolev et al., 1997; Wang et al., 1999; Konzett et al., 2013). Пикроильменит в СКЛМ также распространен в качестве основной метасоматической фазы (Haggerty, 1991). Включения экзотической Fe-Ti-Cr шпинели имеют необычный для мантийных перидотитов состав и приурочены к внешней, обогащенной Ca, Fe, Ti и редкими элементами, зоне негомогенных гранатов, что также однозначно свидетельствует об их метасоматическом происхождении. При образовании включений оксидов и хромистых пиропов источником несовместимых элементов являются метасоматизирующие агенты, тогда как высокие содержания Cr как во включениях, так и в гранате, унаследованы от перидотитового протолита, главными концентраторами Cr в котором являются хромит и субкальциевый высокохромистый гарцбургит-дунитовый пироп.

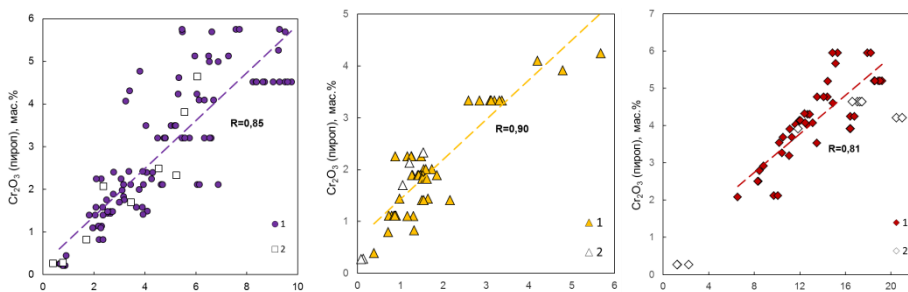


Рис. 4. Положительная корреляция содержаний Cr_2O_3 во вмещающем гранате и включениях рутила, пикроильменита и минералов группы кричтонита (МГК). R – коэффициент корреляции Пирсона. 1 – гранаты и включения из трубки Интернациональная. 2 – гранаты и включения из диатремы Гарнет Ридж (Wang et al., 1999).

Второе защищаемое положение. Содержание $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 1.7$ мас.% в рутиле свидетельствует о генезисе такого рутила в условиях глубинной кратонной перидотитовой мантии. Результаты U-Pb датирования включений рутила в

гранатах из трубки Интернациональная дают возраст 369 ± 10 млн лет, соответствующий возрасту внедрения кимберлитовой магмы трубки Интернациональная. Полученные результаты указывают на то, что высокохромистый рутил является индикаторным минералом глубинных магматических пород, таких как кимберлиты, и может использоваться в алмазопоисковых работах на территории древних кратонов.

В процессе работы был проведен анализ литературы по составам рутила из различных литологических и геодинамических обстановок с целью выявить различия в содержании Cr. На Рис. 5 приведены данные по содержанию TiO_2 и Cr_2O_3 во включениях рутила в перидотитовых и эклогитовых гранатах из трубки Интернациональная. Для сравнения использованы составы включений рутила в коровых гранатах из трубки Майская и ксенокристаллов рутила из концентрата трубки Интернациональная (данные автора), а также составы рутила из разнообразных парагенезисов по мировым литературным данным.

Рутил из метасоматических ассоциаций кратонной литосферной мантии характеризуется повышенными содержаниями Cr_2O_3 от 0,64 до 9,75 мас.%. Составы включений рутила из перидотитовых гранатов трубки Интернациональная существенно перекрываются с составами рутила из ксенолитов перидотитов, вынесенных кимберлитами ЮАР (Jones et al., 1982; Tollo, Haggerty, 1987; Haggerty, 1991; Schulze, 1990; Konzett et al., 2013) и составами включений рутила в лерцолитовых гранатах из ультрамафической диатремы Гарнет Ридж, Аризона, США (Wang et al., 1999). Самое низкое содержание Cr_2O_3 (< 0,4 мас.%) отмечено у рутила из коровых и эклогитовых минеральных ассоциаций. Рутилы из метасоматизированных ксенолитов перидотитов шпинелевой фации глубинности во внекратонных обстановках, вынесенных щелочными базальтовыми магмами (Ionov et al., 1999; Gregoire et al., 2002; Kalfoun et al., 2002; Litasov et al., 2006), характеризуются промежуточными содержаниями Cr_2O_3 между высокохромистыми рутилами кратонной мантии, вынесенными глубинными магмами, и низкохромистыми коровыми рутилами. За исключением зерна рутила с содержанием Cr_2O_3 2,87 мас.% из очень тонкозернистой неравновесной метасоматической жилы (Gregoire et al., 2002), содержание Cr_2O_3 в этой группе варьирует от 0,14 до 1,61 мас.%. Зерна рутила из основной массы кимберлитов характеризуются содержанием Cr_2O_3 от 0,01 до 3,32 мас.% (Boctor, Boyd, 1981; Zurevinski, Mitchell, 2011; Tappe et al., 2014); однако, нужно отметить, что их происхождение в кимберлите может быть различным.

Таким образом, на основе анализа различий в содержании Cr_2O_3 в рутилах из различных породных ассоциаций, можно сделать вывод, что содержание Cr_2O_3 в рутиле выше 1,7 мас.% свидетельствует о принадлежности рутила к кратонной мантии, в то время как рутилы с содержанием Cr_2O_3 ниже 1,7 мас.% могут быть как кратонными, так и внекратонными. Вероятно, данное различие в содержании Cr_2O_3 обусловлено более деплетированным характером кратонной СКЛМ (более высокое отношение Cr/Al) в сравнении с более фертильными перидотитами внекратонных областей (Griffin et al., 2009). Такой характерный признак полезен на начальных этапах поиска, так как известные проявления

кимберлитового магматизма, в соответствии с правилом Клиффорда (Clifford, 1966), локализованы только в пределах архейских и архейско-раннепротерозойских кратонов.

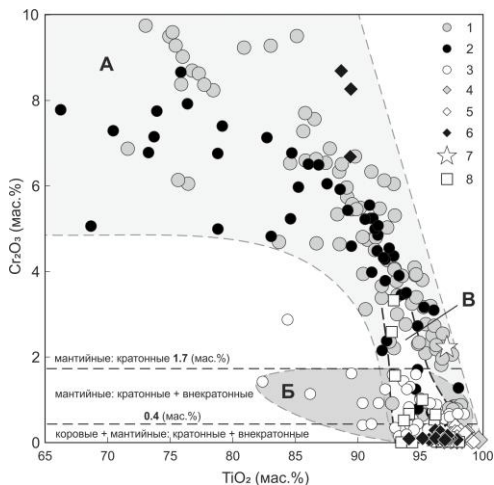


Рис. 5. Составы рутила из различных парагенезисов на диаграмме $\text{TiO}_2 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ (мас.%).

1 – включения в перидотитовых гранатах из трубки Интернациональная; 2 – рутил из метасоматизированных ксенолитов и ксенокристаллы рутила из кимберлитов ЮАР (Jones et al., 1982; Tollo, Haggerty, 1987; Haggerty, 1991; Schulze, 1990; Konzett et al., 2013) и включения в перидотитовых гранатах из ультрамафической диаатремы Гарнет Ридж, Аризона, США (Wang et al., 1999); 3 – рутил в метасоматизированных ксенолитах перидотитов, вынесенных щелочными базальтами (Ionov et al., 1999; Gregoire et al., 2002; Kalfoun et al., 2002; Litasov et al., 2006); 4 – включения в эклогитовых гранатах из трубки Интернациональная; 5 – включения в коровых гранатах из трубки Майская; 6 – ксенокристаллы рутила из концентрата кимберлитовой трубки Интернациональная; 7 – включение в алмазе Mr-25/15 из трубки Мир (Sobolev, Yefimova, 2000; Malkovets et al., 2016); 8 – рутил из основной массы кимберлитов (Bostor, Boyd, 1981; Zurevinski, Mitchell, 2011; Tappe et al., 2014). Выделенные поля составов: А – рутил из кратонных глубинных магматических пород; Б – рутил в метасоматизированных ксенолитах перидотитов внекратонных областей, В – рутил из основной массы кимберлитов.

Дальнейшим развитием этой концепции стало U-Pb датирование зерен рутила в изученных ксенокристаллах граната. Результаты U-Pb датирования рутилов дали возраст 369 ± 10 млн. лет (Рис. 6), соответствующий возрасту внедрения кимберлитовой магмы трубки Интернациональная. Ранние петрологические оценки температуры закрытия для диффузии Pb в рутиле (Tc) выявили достаточно широкий интервал $400-630^\circ\text{C}$. В работе (Mezger et al., 1989) проведенная оценка Tc для зерен рутила размером $90-210$ мкм из протерозойского Адирондакского террейна, Нью-Йорк, США, соответствует 400°C . Эта величина впоследствии была пересмотрена до 540°C (Vry, Baker, 2006). Изучение краев зерен рутила из пород гранулитовой фации Рейнольдс Рэнж, Австралия, позволило получить Tc 630°C , независимо от размера зерна (Vry, Baker, 2006). Наконец, Cherniak (2000) изучил диффузию Pb в рутиле посредством проведения экспериментов по нагреванию природных и синтетических рутилов при температуре в интервале от 700 до 1100°C , что позволило установить Tc в интервале $600-640^\circ\text{C}$ для зерен размером $100-200$ мкм.

Граница шпинелевой и гранатовой фаций глубинности ($20-22$ кбар) в кратонной СКЛМ под Мирнинским полем проходит при температуре $\sim 550-600^\circ\text{C}$, при тепловом потоке 35 мВт/м^2 (Griffin et al., 1999; Hasterok, Chapman, 2011). По данным Ni-термометрии в гранате, температура равновесия для изученных 39 перидотитовых гранатов с включениями рутила варьирует в интервале $725-1030^\circ\text{C}$, что соответствует давлению $33-53$ кбар, или глубине $\sim 100-165$ км, при тепловом потоке 35 мВт/м^2 .

На данный момент невозможно установить, в ходе какого именно метасоматического события, предшествующего внедрению кимберлитовой

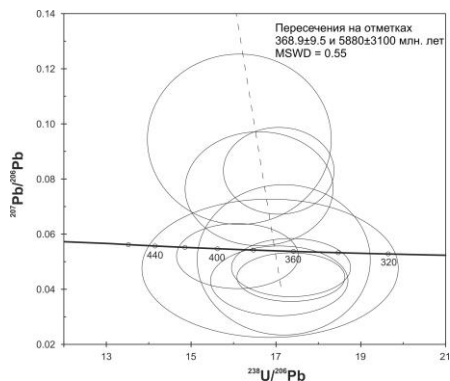


Рис. 6. Диаграмма Тера-Вассербург (“обратная конкордия”) для восьми включений рутила в 5 перидотитовых гранатах и одного включения рутила в эклогитовом гранате из трубки Интернациональная. Полученный возраст на нижнем пересечении 368.9 ± 9.5 млн. лет соответствует возрасту внедрения кимберлитовой магмы трубки Интернациональная.

магмы трубки Интернациональная, кристаллизовались изученные гранаты с включениями рутила. Такое метасоматическое событие может быть как относительно недавним, так и иметь архейский или протерозойский возраст. Как бы то ни было, гранаты с

включениями рутила со времени своего образования находились в мантии при температуре, существенно превышающей петрологические ($400\text{--}630^\circ\text{C}$; Mezger et al., 1989; Vry, Baker, 2006) и экспериментальные ($600\text{--}640^\circ\text{C}$; Cherniak, 2000) оценки T_c в рутиле. Таким образом, за весь период времени, проведенного гранатами в мантии, происходило постоянно переустановка U-Pb системы в рутиле, а полученный возраст соответствует времени внедрения кимберлитовой магмы, захватившей гранаты, как прямое следствие охлаждения и падения температуры ниже температуры закрытия для диффузии Pb в рутиле.

Характерная высокая хромистость и свойство мантийного рутила регистрировать возраст внедрения кимберлитовой магмы обуславливают полезность рутила как индикаторного минерала кимберлитов. Рутил наряду с алмазом, цирконом, пиропом, хромитом, и пикроильменитом, является химически и физически стойким минералом, накапливающимся в россыпях. В пределах Сибирского кратона надежно выявлено четыре эпизода кимберлитового магматизма и множество аллювиальных алмазосодержащих россыпей без установленного источника. С использованием описанного подхода, можно датировать не только конкретные кимберлиты, но и получать возраст материала, представленного в россыпях (то есть получать возраст материнского кимберлита). Хромистый рутил может стать крайне полезным инструментом для алмазопроисловых работ на территории древних кратонов. Помимо кимберлитов, можно также оценивать возраст других глубинных мантийных щелочных пород (лампроитов, карбонатитов и т.д.), вынесших ксенокристаллы рутила или рутил содержащие ксенолиты на поверхность, и, соответственно, использовать этот подход в поисковых работах на другие типы месторождений рудных полезных ископаемых.

Важным подтверждением ценности хромистого рутила в качестве индикаторного минерала кимберлитов является находка включения хромистого рутила, наряду с минералами перидотитового парагенезиса, в алмазе из трубки Мир (Sobolev, Yefimova, 2000; Malkovets et al., 2016). Этот уникальный образец прямо свидетельствует об ассоциации рутила с алмазом перидотитового парагенезиса и дополняет данные по Мирнинскому полю, полученные в ходе настоящей работы для гранатов из трубки Интернациональная.

Третье защищаемое положение. Гранаты преимущественно лерцолитового парагенезиса с включениями высокотитанистых оксидов характеризуются только дугообразным (нормальным) распределением РЗЭ. Гранаты с включениями сульфидов относятся к лерцолитовому и гарцбургит-дунитовому парагенезисам и имеют как дугообразные, так и синусоидальные спектры РЗЭ. По данным Ni-термометрии, гранаты с включениями оксидов имеют пик распределения по температуре равновесия на отметке 800°C (120 км), а гранаты с включениями сульфидов – на отметке 950°C (165 км). Полученные данные свидетельствуют о вертикальной гетерогенности процессов мантийного метасоматического обогащения в разрезе литосферной мантии под трубкой Интернациональная.

Геохимические исследования, направленные на выявление особенностей редкоземельного состава гранатов, показали, что гранаты с включениями оксидов существенно отличаются от гранатов с включениями сульфидов по целому ряду параметров:

1) Содержание Са, Сг и тип парагенезиса. Подавляющее большинство гранатов с включениями оксидов принадлежат лерцолитовому тренду при подчиненном количестве верлитовых гранатов и всего одном гранате с включениями хромита гарцбургит-дунитового парагенезиса (Рис. 7), в то время как треть гранатов с включениями сульфидов относятся к гарцбургит-дунитовому парагенезису, в том числе и к полю составов гранатов в ассоциации с алмазом на диаграмме $\text{CaO}-\text{Cr}_2\text{O}_3$ (Соболев и др., 1969; Sobolev et al., 1973). Гранаты с сульфидами также в среднем более хромистые и имеют содержание $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 2$ мас. %.

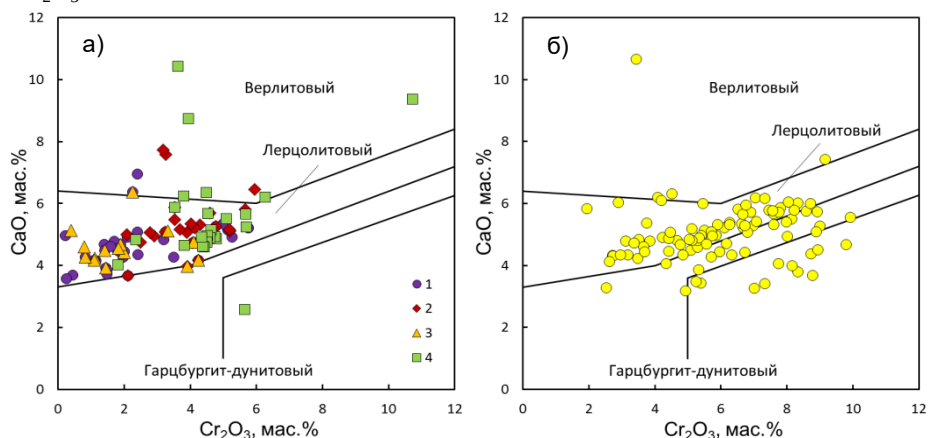


Рис. 7. Состав перидотитовых гранатов с включениями оксидов (а) и сульфидов (б) из кимберлитовой трубки Интернациональная на диаграмме $\text{CaO}-\text{Cr}_2\text{O}_3$ (Соболев и др., 1969; Sobolev et al., 1973). 1 – пиропы с включениями рутила; 2 – пиропы с включениями минералов группы кричтонита, 3 – пиропы с включениями пикроильменита, 4 – пиропы с включениями шпинели. N = 84 (а) и 97 (б).

2) Геохимические спектры и степень деплетированности. Гранаты с включениями высокотитанистых оксидов имеют только типичные для лерцолитовых гранатов редкоземельные спектры с постепенным увеличением

концентрации РЗЭ от легких к тяжелым. Напротив, среди гранатов с включениями сульфидов велика доля образцов с синусоидальными распределениями, в том числе с большим “провалом” в области тяжелых РЗЭ. Гранаты с включениями хромита, подобно гранатам с включениями высокотитанистых оксидов, в основном характеризуются типичными для лерцолитовых гранатов распределениями, и только три граната с включениями хромита имеют синусоидальные спектры.

Наиболее деплетированные гарцбургит-дунитовые гранаты, ассоциирующие с алмазом, имеют высокие содержания Cr_2O_3 и низкие содержания Y (<10 ppm) (O'Reilly, Griffin, 2013). По содержанию Cr и Y исследованные группы гранатов существенно различаются. Гранаты с включениями Ti-оксидов в среднем менее хромистые и более иттриевые, в то время как гранаты с включениями сульфидов более хромистые и менее иттриевые – большая часть гранатов этой группы имеет содержание $\text{Y} <10$ ppm. Гранаты с включениями хромита занимают промежуточное положение между гранатами с включениями Ti-оксидов и сульфидов.

3) Температуры равновесия. Наибольшее количество гранатов с включениями оксидов имеют температуру равновесия по данным Ni-термометрии (Ryan et al., 1996) на отметке $\sim 800^\circ\text{C}$, и менее выраженный пик при температуре $\sim 950\text{--}970^\circ\text{C}$, в то время как для гранатов с включениями сульфидов распределение обратное (Рис. 8). Гранаты с включениями сульфидов с средним являются на 150°C более высокотемпературными, чем гранаты с включениями оксидов. При значениях теплового потока 35 мВт/м^2 , температура 800°C соответствует давлению ~ 40 кбар (120 км), а температура 970°C соответствует давлению ~ 55 кбар (165 км).

Таким образом, гранаты с включениями оксидов и сульфидов вынесены с различных глубин СКЛМ под трубкой Интернациональная, что обуславливает различия в химическом составе и типе включений. Проявления мантийного метасоматического преобразования, приводящие к образованию лерцолитовых гранатов, затронули менее глубинные уровни разреза СКЛМ, и наиболее

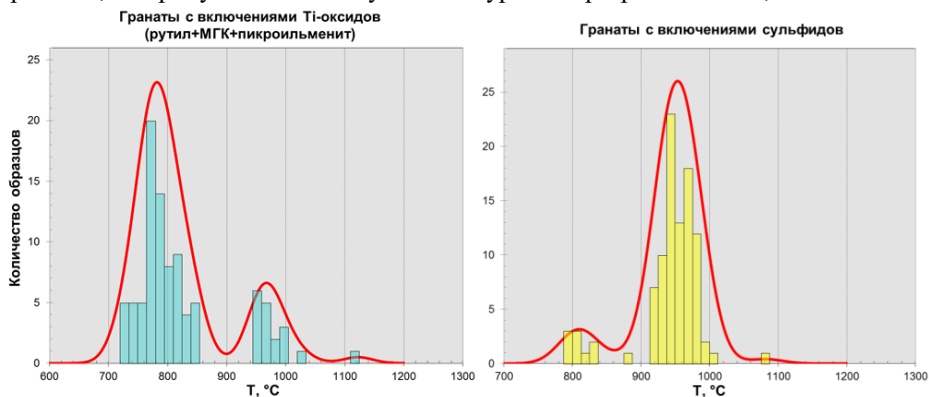


Рис. 8. Распространенность гранатов по температуре равновесия, определенной методом Ni-термометрии (Ryan et al., 1996). МГК – минералы группы крйтонита.

выраженно проявились на глубинах около 120 км. Характерно, что все гранаты с включениями редких метасоматических минералов группы кричтонита имеют температуру равновесия не выше 840°C, то есть вынесены кимберлитовой магмой с глубины не больше 130 км, хотя, согласно экспериментальным данным (Konzett et al., 2005), типичные мантийные минералы группы кричтонита серии LIMA устойчивы до 1500-1600°C и 11-12 ГПа. Гранаты с синусоидальным распределением РЗЭ и включениями сульфидов являются в среднем более глубинными и менее затронуты процессом, обуславливающим обогащение граната средними и тяжелыми РЗЭ совместно с кристаллизацией высокотитанистых оксидов. Тем не менее, они также могут являться продуктом более раннего метасоматического преобразования, на что указывает обогащение в области легких-средних редкоземельных элементов.

Четвертое защищаемое положение. *Негомогенные гранаты из трубки Интернациональная характеризуются увеличением содержания Ca, Ti, Fe и редких элементов в краевой зоне, которая образована в результате замещения исходного граната в ходе метасоматического события, произошедшего незадолго (<15000 лет) до внедрения кимберлитовой магмы трубки Интернациональная.*

Помимо гомогенных гранатов с включениями из трубки Интернациональная без значимых вариаций химического состава в пределах зерна, в процессе исследования было изучено пять негомогенных зерен хромистого пиропы, характеризующихся ярко-выраженной зональностью, как по главным элементам, так и по элементам-примесям. Четыре образца имеют относительно гомогенное ядро и неоднородную внешнюю кайму (Рис. 9); пятый образец (INT-70) характеризуется также зонами контрастного состава, проходящими через зерно. Все зональные гранаты содержат таблитчатые включения шпинелидов размером до 100 мкм; в образцах INT-70, -289, -263 наблюдаются включения хромита, а в образцах -241 и -269 обнаружены включения необычного Fe-Ti-Cr шпинелида, которые приурочены только к внешней зоне вмещающего граната.

Профиль от центра к краю гранатов характеризуется значительными градиентами химического состава, а именно увеличением содержания Ca, Ti, снижением концентрации Mg, а также совместным снижением концентрации Al и Cr, что свидетельствует о привносе трехвалентного железа и вероятном образовании каймы в окислительных условиях. В образцах INT-269, -241, -289 также увеличивается содержание Fe и Mn от центра к краю. Содержания CaO, MgO, FeO изменяются на несколько массовых процентов; два граната имеют гарцбургит-дунитовое ядро и верлитовую кайму, и три граната характеризуются лерцолитовым ядром и верлитовой каймой (Рис. 10). Концентрации почти всех редких элементов в краевой зоне сильно увеличиваются (иногда на порядок) (Рис. 11), снижается только содержание Ni.

Гранаты имеют S-образные формы профилей концентраций элементов от центра к краю. Это свидетельствует о диффузионном выравнивании контрастных составов граната после формирования каймы.

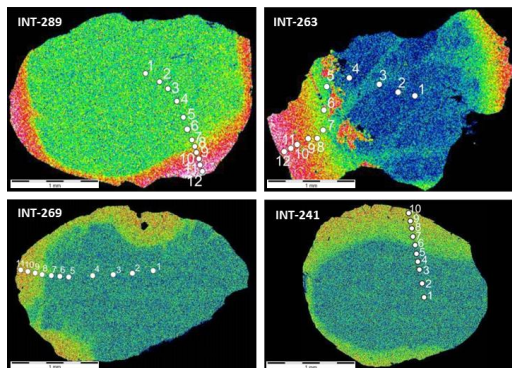


Рис. 9. Элементное картирование негомогенных гранатов из трубки Интернациональная по Са на сканирующем электронном микроскопе с указанием точек, в которых был проведен анализ редких элементов методом LA-ICPMS.

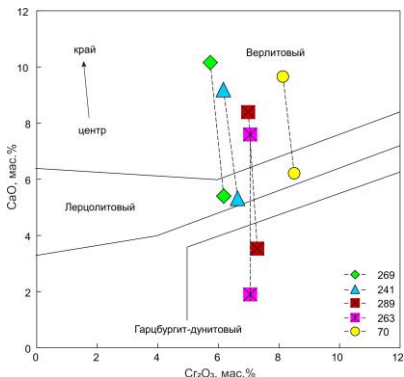


Рис.10. Состав негомогенных гранатов из трубки Интернациональная в координатах Cr_2O_3 (мас.%) – CaO (мас.%) (Соболев и др., 1969; Sobolev et al., 1973).

Рассчитанные с использованием Ni-термометрии (Ryan et al., 1996) температуры для края гранатов находятся в диапазоне 680-930°C. Время образования каймы приблизительно установлено на основе формы профиля, коэффициента диффузии и радиуса зерна. Рассчитанное время с использованием коэффициента диффузии Mg (Королюк, Лепезин, 2008) является очень небольшим по геологическим меркам и составляет до 15000 лет до внедрения кимберлитовой магмы трубки Интернациональная.

Наличие ярко-выраженной зональности в гранатах, характеризующихся гомогенным ядром и неоднородной внешней каймой, обогащение каймы негомогенных гранатов Ca, Ti, Fe и редкими элементами, наличие в краевой зоне включений необычного Fe-Ti-Cr шпинелида и S-образные профили концентраций элементов от центра к краю, позволяют утверждать, что кайма образована в результате замещения исходного граната при взаимодействии с метасоматическим агентом. Такой агент мог иметь как стороннее происхождение, так и быть связанным с протокимберлитовым расплавом.

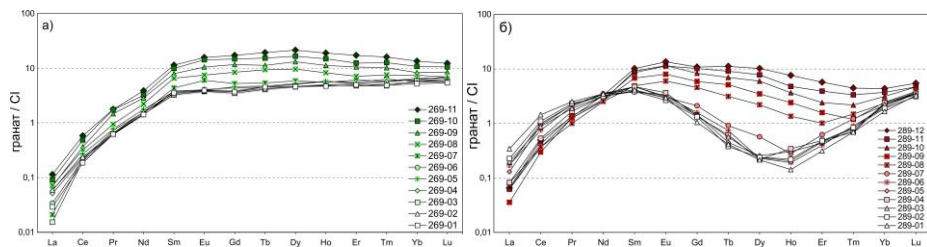


Рис. 11. Распределение РЗЭ от центра к краю в гранатах INT-269 (а) и INT-289 (б). Нормирование производилось по составу хондрита (McDonough, Sun, 1995). Центр соответствует точке 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы было систематически изучено 102 граната с включениями оксидов и 97 гранатов с включениями сульфидов из концентрата тяжелой фракции кимберлитовой трубки Интернациональная. Установлен химический состав минеральных включений и вмещающих гранатов, определен редкоэлементный состав гранатов, подробно изучены геохимические особенности неомогенных гранатов со значимыми вариациями составов в пределах зерна. Крупные включения рутила продатированы U-Pb методом; полученные результаты соответствуют времени внедрения кимберлитовой трубки Интернациональная.

Одним из основных ожидаемых результатов исследования являлось установление генезиса хромистых гранатов в литосферной мантии Мирнинского поля. Метасоматическое образование лерцолитовых гранатов удалось подтвердить по целому ряду признаков:

- 1) наличие в виде включений в гомогенных гранатах высокотитанистых оксидов (рутил, пикроильменит, минералы группы кричтонита), обогащенных редкими и несовместимыми элементами;
- 2) дугообразные спектры распределения РЗЭ таких гранатов;
- 3) экстремальное обогащение Са, Fe, Ti и редкими элементами в каймах неомогенных гранатов;
- 4) наличие в каймах неомогенных гранатов включений необычного Fe-Ti-Cr шпинелида.

Данные признаки указывают на то, что хромистые гранаты в литосфере рассматриваемого региона имеет метасоматическое происхождение, а не являются частью тугоплавкого рестита от процессов частичного плавления. Некоторые гранаты с включениями хромита и существенная часть гранатов с включениями сульфидов, имеющие гарцбургит-дунитовый парагенезис и синусоидальные профили распределения РЗЭ, также могут являться продуктом более раннего метасоматического преобразования, на что указывает обогащение в области легких-средних редкоземельных элементов.

Дискуссионным остается вопрос о возрасте изученных гранатов. Он может быть как древним (архейским или протерозойским), так и сравнительно молодым, приближаясь к возрасту кимберлитовой трубки Интернациональная. Удалось установить только возраст образования каймы неомогенных гранатов, который соответствует времени метасоматического события в истории литосферы Мирнинского поля, произошедшего незадолго (до 15000 лет) до внедрения кимберлитовой магмы трубки Интернациональная.

Установление нового алмазопойскового критерия является важным результатом работы. Характерная высокая хромистость, устойчивость в приповерхностных процессах, и свойство мантийного рутила регистрировать возраст внедрения кимберлитов обуславливает исключительную полезность ксенокристаллов рутила для поиска новых алмазных месторождений.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Резвухин Д.И.**, Мальковец В.Г., Шарыгин И.С., Кузьмин Д.В., Литасов К.Д., Гибшер А.А., Похиленко Н.П., Соболев Н.В. Включения хромистого и хром-ниобиевого рутила в пиропсах из кимберлитовой трубки Интернациональная, Якутия // Доклады Академии Наук. – 2016. – Т. 466. – № 5. – С. 587-591.
2. **Резвухин Д.И.**, Мальковец В.Г., Шарыгин И.С., Кузьмин Д.В., Гибшер А.А., Литасов К.Д., Похиленко Н.П., Соболев Н.В. Включения минералов группы кричтонита в пиропсах из кимберлитовой трубки Интернациональная, Якутия // Доклады Академии Наук. – 2016. – Т. 466. – № 6. – С. 714-717.
3. Malkovets V.G., **Rezvukhin D.I.**, Belousova E., Griffin W.L., Sharygin I.S., Tretiakova I.G., Gibsher A.A., O'Reilly S.Y., Kuzmin D.V., Litasov K.D., Logvinova A.M., Pokhilenko N.P., Sobolev N.V. Cr-rich rutile: A powerful tool for diamond exploration // Lithos. – 2016. – V. 265. – P. 304-311.

Избранные тезисы докладов:

1. **Rezvukhin D.I.** Oxide mineral inclusions in pyropes from the Internationalnaya kimberlite pipe, Yakutia // The 6th International Siberian Early Career GeoScientists Conference, 2012, Novosibirsk, Russian Federation, Abstract Volume, P. 40.
2. **Rezvukhin D.I.**, Malkovets V.G., Kuzmin D.V., Griffin W.L., Pokhilenko N.P., O'Reilly S.Y., Gibsher A.A. Oxide mineral inclusions in pyropes from the Internationalnaya kimberlite pipe, Yakutia // 10th International Kimberlite Conference, 2012, Bangalore, India, Long Abstract No.10IKC-235.
3. **Rezvukhin D.I.**, Malkovets V.G., Kuzmin D.V., Gibsher A.A., Litasov K.D. Inclusions of crichtonite series minerals in peridotitic pyropes from the Internationalnaya kimberlite pipe, Yakutia // III International Conference "Crystallogenesi and mineralogy", 2013, Novosibirsk, Russia, Abstract Volume, P. 254-255.
4. **Rezvukhin D.I.**, Malkovets V.G., Sharygin I.S., Ota T., Tsujimori T., Nakamura E. Major-and trace-element zoning in Cr-pyropes with spinel inclusions from the Internatsionalnaya kimberlite pipe, Siberian craton // 26th Goldschmidt Conference, 2016, Yokohama, Japan, Abstract No. 2621.

Подписано в печать 29.12.16

Формат 60×84/16. Печ. л. 1,0

Тираж 120 экз. Заказ № 365

Издательство СО РАН

630090, Новосибирск, Морской пр., 2

Отпечатано в Издательстве СО РАН