

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Института  
геологии и минералогии им.

В.С. Соболева Сибирского  
отделения Российской академии  
наук, академик РАН  
Похиленко Николай Петрович



« 12 » декабря 2016 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН).

Диссертация «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» выполнена в лаборатории минералов высоких давлений и алмазных месторождений (№ 451) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук.

В период подготовки диссертации соискатель **Резвухин Дмитрий Иванович** работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН) в лаборатории минералов высоких давлений и алмазных месторождений (№ 451) в должности лаборанта, затем инженера и младшего научного сотрудника. В настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника.

В 2013 г. окончил магистратуру геолого-геофизического факультета Новосибирского государственного университета (в настоящее время Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет») по специальности «геохимия». В 2016 году окончил очную аспирантуру при Институте ИГМ СО РАН по специальности 25.00.05 – «минералогия, кристаллография» с представлением.

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов (№ 113) выдано в 2016 году (30.09.2016 г.) в ИГМ СО РАН.

Научный руководитель – Мальковец Владимир Григорьевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории № 451 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук.

#### По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Объектом исследования диссертационной работы Д.И. Резвухина являются ксенокристаллы граната перидотитового (хромистый пироп) и эклогитового



парагенезисов из концентрата тяжелой фракции трубки Интернациональная и включения оксидов и сульфидов.

#### **Актуальность исследований.**

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 (Мирниское 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 алмазопоисковых работ.

#### **Наиболее важные научные результаты, полученные соискателем:**

1) В перидотитовых гранатах из трубки Интернациональная установлены включения рутила, обогащенного высоkozарядными элементами (до 15,57 мас.%  $Nb_2O_5$ ), пикроильменита, Fe-Ti-Cr шпинели, минералов группы кричтонита, обогащенных крупноионными литофильными (Ba, Sr), высоkozарядными (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.

2) Содержание  $Cr_2O_3 > 1.7$  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  $369 \pm 10$  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.

3) 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  $800^\circ C$  (120 км), а гранаты с включениями сульфидов – на отметке  $950^\circ C$  (165 км). Полученные данные свидетельствуют о вертикальной гетерогенности процессов мантийного метасоматического обогащения в разрезе литосферной мантии под трубкой Интернациональная.



4) Неомогенные 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.

**Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации.**

Основу диссертации составляют исследования, проведенные в период с 2009-2016 гг. Личный вклад автора состоит в отборе гранатов из концентрата тяжелой фракции трубки Интернациональная и пробоподготовке (> 200 индивидуальных шашек из эпоксидной смолы) для лабораторных исследований. Лично автором проводились также аналитические исследования с помощью методов оптической, электронной сканирующей микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа и масс-спектропии вторичных ионов (на приборе SIMS CAMECA ims5f.). Совместно с соавторами опубликованных работ проведена интерпретация полученных данных, написаны тексты статей и тезисов докладов для конференций.

**Высокая степень достоверности и обоснованности результатов проведенных исследований.**

Результаты диссертационной работы Д.И. Резвухина, ее научные положения и выводы являются достоверными и обоснованными. Достоверность представленных результатов исследования ксенокристаллов граната с включениями из кимберлитовой трубки Интернациональная основывается на высоком научно-методическом уровне проведения работы, представительности исходных данных, а также корректном использовании общепринятых методик, глубокой проработке научной литературы и ее широком использовании.

Применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс современных методов исследования.

Определение элементного состава гранатов и включений проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6510LV, совмещенного с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350 (Oxford Instruments) и безазотным SDD детектором вторичных электронов X-Max-80 (Oxford Instruments), и рентгеноспектрального микроанализатора JEOL JXA-8100 (ИГМ СО РАН, Новосибирск, Россия), а также сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-7001F, совмещенного с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350, и рентгеноспектрального микроанализатора JEOL JXA-8800 (Institute for the Study of the Earth's Interior, Университет Окаямы, Мисаса, Япония). Определение редкоэлементного состава гранатов и U-Pb датирование включений рутила проводилось с помощью метода индуктивно-связанной плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS) с лазерным пробоотборником (LA: laser ablation или LAM: laser ablation microprobe) LA-ICP-MS 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. Исследование проведено с использованием квадрупольного ICP-MS масс-спектрометра Agilent 7700, совмещенного с системой эксимерного лазерного пробоотбора Photon Machines Excimer 193 nm. Обработка исходного аналитического сигнала производилась с использованием программного обеспечения GLITTER (<http://www.glitter-gemoc.com>; Griffin et al., 2008), разработанного в CCFS/GEMOC ARC National Key Centre, Университет Маккуори, Сидней, Австралия. Редкоэлементный состав гранатов и их геохимические особенности были также изучены с использованием ионного зонда CAMECA SIMS ims5f (Institute for the Study of the Earth's Interiors, Университет Окаяма, Мисаса, Япония).



Результаты исследований апробированы на российских и международных конференциях, а также опубликованы в рецензируемых журналах.

#### **Научная новизна.**

1) Проведено комплексное изучение химического и редкоземельного составов гранатов и химического состава включений оксидов и сульфидов из кимберлитового тела (трубка Интернациональная) в пределах Сибирского кратона; 2) Установлено максимальное содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  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  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  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 А и Fe в позиции В; 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.

#### **Практическая значимость и ценность научной работы соискателя:**

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

#### **Соответствие диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите.**

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

#### **Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.**

Основные научные результаты и материалы диссертационного исследования достаточно полно изложены в научных публикациях соискателя (с соавторами). Д.И. Резвухин имеет 13 опубликованных работ, из них по теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 3 статьи в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций, и 7 работ в материалах всероссийских и международных конференций.

#### **Основные публикации соискателя, в которых опубликованы материалы 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.

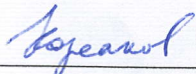
2. **Rezvukhin D.I.**, Malkovets V.G., Kuzmin D.V., Griffin W.L., Pokhilenko N.P., O'Reilly S.Y., Gibsher A.A. Oxide mineral inclusions in pyropes from the Internationalnaya kimberlite pipe, Yakutia // 10th International Kimberlite Conference, 2012, Bangalore, India, Long Abstract No.10IKC-235.

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 // 26<sup>th</sup> Goldschmidt Conference, 2016, Yokogama, Japan, Abstract No. 2621.

Диссертация «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» Резвухина Дмитрия Ивановича рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук по специальностям 25.00.05 – «минералогия, кристаллография».

Заключение принято на расширенном заседании лаборатории минералов высоких давлений и алмазных месторождений (№ 451) ИГМ СО РАН. Присутствовало на заседании 28 человек (из них 11 докторов геол.-мин. наук, 9 кандидатов геол.-мин. наук, а также 2 м.н.с и аспирантов и 6 инженеров). Результаты открытого голосования по вопросу принятия заключения по диссертации Д.И. Резвухина: «за» – 28 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 2016/12-1 от 09 декабря 2016 г.

  
\_\_\_\_\_

Заключение оформил:

*Корсаков Андрей Викторович,  
доктор геолого-минералогических наук,  
заведующий лабораторией минералов высоких  
давлений и алмазных месторождений (№ 451)  
ИГМ СО РАН*