

На правах рукописи



КОМПАНЧЕНКО Алёна Аркадьевна

**ХРОМ-СКАНДИЙ-ВАНАДИЕВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ
В КОЛЧЕДАНЫХ РУДАХ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ
СУПРАКРУСТАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ
КОЛЬСКОГО РЕГИОНА**

Специальность 25.00.05 - минералогия, кристаллография

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва - 2019

Работа выполнена в Геологическом институте - обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»

Научный руководитель: Доктор геолого-минералогических наук
Волошин Анатолий Васильевич

Официальные оппоненты: Дергачев Александр Лукич
Доктор геолого-минералогических наук,
заместитель декана, профессор кафедры
геологии, геохимии и экономики полезных
ископаемых Геологического факультета
Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова
Карпенко Владимир Юрьевич
кандидат геолого-минералогических наук,
заместитель директора по общим вопросам
Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана

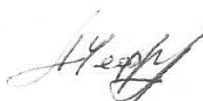
Ведущая организация: Институт геологии – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр» Российской академии наук (ИГ КарНЦ РАН).

Защита состоится «29» мая 2019 года в 11 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 002.122.02 при Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 35, ИГЕМ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИГЕМ РАН.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019

Ученый секретарь
диссертационного совета
Кандидат геолого-
минералогических наук



Чефранова А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Начиная с 30-х гг. прошлого века, колчеданные руды, локализованные в поясе Печенга-Имандра-Варзуга (ПИВ) Кольского региона, привлекали внимание исследователей: как сырье для производства серной кислоты (Седлис, 1933; Константов и др., 1935), как потенциальные носители Cu-Ni оруденения (Иванова, 1954; Филимонов, 1971; Паничев, 1995), как источник благородных металлов (Ахмедов и др., 2004; Карпов, Волошин, 2013). Однако, в связи с незначительными выявленными запасами всех вышеперечисленных компонентов и слабой изученностью, колчеданные руды так и не нашли применения в промышленности региона.

В последние годы, в колчеданных рудах западной части Имандра-Варзугской структурной зоны (ИВСЗ, далее - Прихибинья) был установлен принципиально новый ванадиевый тип минерализации (Карпов и др., 2012а; Карпов и др., 2013б). Данный тип минерализации пространственно тесно связан со скандиевым. Он представлен как собственными оксидными и силикатными формами ванадия, так и существенной примесью ванадия и скандия в других минералах (Карпов и др., 2016).

Колчеданные проявления южной зоны Печенгской структуры по минеральному составу и приуроченностью к определенным уровням разреза в целом подобны рудопоявлениям Прихибинья. Однако о наличии хром-скандий-ванадиевой (Cr-Sc-V) минерализации в этих рудах известно не было. Первые же исследования этой минерализации, проведенные автором на одном из объектов, дали положительные результаты. В этой связи актуальной является всестороннее изучение нового для колчеданных руд Кольского региона Cr-Sc-V типа минерализации на основе исследований основных минеральных форм этих элементов, выделения минеральных ассоциаций, изучения взаимоотношений минералов.

Объекты исследования: основной - колчеданное проявление Брагино в Южно-Печенгской структурной зоне (ЮПСЗ). Сравнительная характеристика проявления Брагино с колчеданными рудами Прихибинья проводилась на основании литературных данных.

Цели и задачи исследования: всестороннее исследование нового для колчеданных руд Кольского региона Cr-Sc-V типа минерализации.

Для достижения цели был поставлен и решен ряд задач: (1) изучить геологическое строение участков проявления колчеданных руд и сопоставить их между собой в геологическом разрезе полосы ПИВ; (2) выполнить типизацию колчеданных руд на основе их текстурных особенностей и минерального состава; (3) выявить особенности химического состава, морфологии и ассоциации Cr-Sc-V минерализации в разных типах руд, эволюционные ряды и последовательность минералообразования; (4) выявить генетическую позицию Cr-Sc-V минерализации;

(5) провести сравнительный анализ Cr-Sc-V минерализации в колчеданных проявлениях Кольского региона с объектами, где проявляется похожий тип минерализации.

Фактический материал и методы исследований: Фактическим материалом для исследования послужили более 200 образцов колчеданных руд проявления Брагино, ЮПСЗ. Большая часть образцов собрана автором во время полевых работ 2015-2016 гг., а также была изучена коллекция образцов, шлифов и аншлифов 2011 года, предоставленная к.г.-м.н. С.М. Карповым (ФИЦ ГИ КНЦ РАН).

Первичная обработка материала включала минералогическое описание и отбор образцов и проб для дальнейшего изучения. Изучение аншлифов и шлифов проводилось на оптическом микроскопе AxioPLAN с блоком видеорегистрации, в отраженном и проходящем поляризованном свете. Исследование морфологии, фазовой и внутрифазовой неоднородности минералов проводилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) LEO-1450 с оценкой состава минеральных фаз посредством энергодисперсионного спектрометра (ЭДС) Bruker XFlash 5010 (аналитик к.г.-м.н. А.В. Базай,); СЭМ Hitachi S-3400N с ЭДС Oxford X-Max 20 (аналитики Н.С. Власенко и В.В. Шиловских, ресурсный центр (РЦ) СПбГУ «Геомодель», Санкт-Петербург). Количественный анализ минералов выполнен на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca MS-46 (аналитик А.В. Базай, ГИ КНЦ РАН). В результате получено более 600 химических анализов составов минералов и более 100 изображений минералов в обратно-рассеянных и вторичных электронах. Регистрация спектров отражения производилась на микроспектрофотометре МСФ-21, исследование микротвердости производилось на микротвердометре ПМТ-3 (СПбГУ, исполнитель к.г.-м.н. Ю.С. Полевоский). Также микротвердость минералов измерялась автором в ГИ КНЦ РАН на приборе ПМТ-3. Рентгенограммы порошка минералов получены на рентгеновском аппарате УРС-55 (аналитики к.г.-м.н. Е.А. Селиванова, М.В. Торопова и М.Ю. Глазунова, ГИ КНЦ РАН). Рамановские спектры минералов регистрировались на спектрометрах: Almega XR ThermoScientific, микроскоп Olympus BX51, объектив 100х, лазеры 532 nm и 785 nm (Институт геологии КарНЦ РАН, г. Петрозаводск, выполнены автором); Horiba LabRam HR800, микроскоп Olympus BX41, объектив 50х, лазеры 488 nm и 514 nm (РЦ «Геомодель», оператор В.Н. Бочаров); LabRam HP Evolution Horiba Scientific, объектив Olympus LM Plan FL N 100х, лазер 488 nm (ИНХ СО РАН, г. Новосибирск, оператор д.х.м. Б.А. Колесов). Получение картин дифракции проводилось с использованием СЭМ HITACHI S3400N с детектором дифракции отраженных электронов (EBSD) Oxford HKL Nordlys Nano (аналитик В.В. Шиловских, ресурсный центр (РЦ) СПбГУ «Геомодель», Санкт-Петербург). Предварительное травление поверхности аншлифов для исследований методом EBSD проводилось на установке Oxford IonFab 300, аргонная плазма. Для выявления внутреннего строения зерен пирита применялось травление концентрированной HNO_3 с молотым флюоритом.

Научная новизна работы:

1. В результате проведенных минералогических исследований в колчеданных рудах ЮПСЗ выявлен новый тип минерализации - хром-скандий-ванадиевый (Cr-Sc-V).

2. В рудах проявления Брагино установлены редкие минеральные фазы Cr-Sc-V минерализации, которые являются первыми находками в Кольском регионе (кызылкумит, ноланит, роскоэлит) и в России (тиванит, джервисит, сенаит). Большинство минералов изучены с использованием современных методов исследования и охарактеризованы двумя параметрами конституции - химическим составом (рентгеноспектральный анализ ЭДС или ВДС) и кристаллической структурой (рентгеноструктурный анализ, рамановская спектроскопия, EBSD).

3. Выявлено уникальное разнообразие минералов группы критонита в колчеданных рудах Кольского региона (установлены 6 минеральных видов: критонит, сенаит, линдслейит, давидит-(La), давидит-(Ce), ловерингит), в которых наблюдаются аномально высокие содержания V_2O_3 (до 23 мас.%) и Sc_2O_3 (до 3 мас.%).

4. Установлен эволюционный ряд минералов, отражающий изменение самих руд проявления Брагино - ряд минералов группы шпинели: хромит→кульсонит→магнетит.

5. Выявлены и изучены ванадийсодержащие минеральные фазы, которые при дальнейших исследованиях могут перейти в статус новых минеральных видов ("брагиноит" - силикат V-Al-Si-O состава, "ванадоалланит-(Nd)", "ванадоалланит-(Ce)" и др.).

6. Проведен сравнительный анализ проявлений колчеданных руд Кольского региона с разновозрастными колчеданными образованиями мира и объектами другого генезиса, в которых установлена Cr-Sc-V минерализация. Анализ показал, что формирование этой необычной минерализации связано с метаморфическими преобразованиями и гидротермальной проработкой руд.

Практическая значимость работы: выявление принципиально нового типа минерализации в колчеданных рудах всего пояса ПИВ позволяет по-новому взглянуть на металлогенические особенности вулканогенно-осадочных комплексов Кольского региона. Дальнейшее развитие исследований может привести к открытию ранее неизвестных в Кольском регионе проявлений скандиевой и ванадиевой минерализаций, также понять динамику миграции элементов в колчеданных рудах при их метаморфических преобразованиях и оценить возможность использования колчеданных руд как потенциальный источник ванадия и скандия. Присутствие ванадиевой минерализации, практически аналогичной ПИВ, в крупнейших золоторудных месторождениях мира - Биг Белл, Калгурли, Хемло и др., локализованных в древних зеленокаменных поясах, может косвенным образом указывать на перспективность обнаружения крупных рудопоявлений золота в поясе

ПИБ. Установление крайне редких минеральных видов расширяет спектр минералов Кольского региона и подчеркивает его минеральное богатство и разнообразие.

Апробация работы: результаты работы докладывались на 19 конференциях всероссийского и международного уровня: XV Международная научная конференция студентов и аспирантов «Проблемы арктического региона» (Мурманск, 2015); XII-XV Всероссийские (с международным участием) Ферсмановские научные сессии (Апатиты, 2015-2018); XXVI-XVIII молодёжные научные школы-конференции, посвящённые памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова «Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии» (Петрозаводск, 2015; Апатиты, 2016; Санкт-Петербург, 2017); XII Съезд Российского минералогического общества: «Минералогия во всем пространстве сего слова» (Санкт-Петербург, 2015) и Юбилейный съезд «200 лет РМО» (Санкт-Петербург, 2017); Месторождения стратегических металлов: закономерности размещения, источники вещества, условия и механизмы образования; Всероссийская конференция, посвящённая 85-летию ИГЕМ РАН (Москва, 2015); Конференции, посвященные Дню Науки в РФ (Апатиты, 2016-2018); XXII и XXIV молодежные научные школы «Металлогения древних и современных океанов» (Миасс, 2016, 2018); XII International Conference GeoRAMAN-2016 (Новосибирск, 2016); Восьмая международная Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 2016) Всероссийская конференция молодых ученых «Современные проблемы геохимии-2018» (Иркутск, 2018). По вопросам, обсуждаемым в диссертации, опубликовано 24 работы, среди них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация объемом 162 страницы включает Введение, 4 главы, Заключение, список литературы из 244 наименований, 4 Приложения, содержит 24 таблицы и 93 рисунка. В *главе первой* дан краткий литературный обзор истории изучения колчеданных руд Кольского региона, а также собраны данные о распространенности и месторождениях хрома, скандия и ванадия в регионе и проявлениях Cr-Sc-V минерализации в России и мире. Во *второй главе* представлены сведения о геологической позиции, строении и истории геологического развития пояса ПИБ, кратко рассмотрены геологическое строение ЮПСЗ и Прихибинья. Описано геологическое строение и охарактеризованы текстурные и вещественные типы руд колчеданного проявления Брагино и кратко - объектов Прихибинья. В *главе третьей* детально рассмотрен минеральный состав колчеданных руд уч. Брагино. В отдельном разделе главы рассмотрены представители Cr-Sc-V минерализации и минералы зоны контакта колчеданных руд с вмещающими породами. В *четвертой главе* охарактеризованы возможные источники хрома, скандия и ванадия в колчеданных рудах Кольского региона и сделано предположение о генезисе Cr-

Sc-V минерализации. В заключении приведены основные результаты выполненных исследований и полученные из них выводы.

Благодарности. В первую очередь автор работы благодарна научному руководителю д.г.-м.н. А.В. Волошину, чье мудрое руководство помогало автору на протяжении всего срока обучения в аспирантуре и подготовке настоящей работы. Также за предоставленные образцы, данные и ценные советы автор благодарит к.г.-м.н. С.М. Карпова (ГИ КНЦ РАН). За участие в обсуждении и подготовке работы автор признательна к.г.-м.н. А.А. Калинину, д.г.-м.н. Т.В. Каулиной, к.г.-м.н. Л.М. Лялиной, д.г.-м.н. В.В. Балаганскому, к.г.-м.н. Ю.А. Михайловой (ГИ КНЦ РАН). За помощь в исследованиях минералов автор выражает благодарность к.г.-м.н. А.В. Базай, к.г.-м.н. Е.А. Селивановой, М.В. Тороповой и М.Ю. Глазуновой (ГИ КНЦ РАН), к.г.-м.н. Ю.С. Полеховскому (СПбГУ), Н.С. Власенко, к.х.м. В.В. Шиловских и В.Н. Бочарову (РЦ «Геомодель»), В.А. Колодею (ИГ КарНЦ РАН). За помощь в организации и проведении полевых работ на исследуемом объекте автор глубоко признательна коллегам М.Ю. Сидорову, А.В. Чернявскому, В.И. Басалаевой, П.А. Маурчеву Е.А. Курмину.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Печенгская и Имандра-Варзугская структуры являются наиболее крупными фрагментами рифтогенного пояса Полмак–Пасвик–Печенга–Имандра-Варзуга (далее Печенга–Имандра-Вазуга, ПИВ), который развивался в период 2.5-1.7 млрд. лет (Glebovitsky, 2005; Melezhik and Sturt, 1994; Melezhik et al., 2013; Mints et al., 2015).

Его стратиграфический разрез почти непрерывный и включает все главные типы плутонических пород палеопротерозоя (Ранний докембрий..., 2005; Melezhik, Sturt, 1994; Melezhik et al., 2013; Mints et al., 2015; Rundqvist, Mitrofaniv, 1993).

Колчеданные проявления установлены в вулканогенно-осадочных толщах Южно-Печенгской структурной зоны и в зоне контакта Хибинской щелочной интрузии с супракрустальными породами Имандра-Варзугской структурной зоны, приурочены к пораярвинской и томингской сериям, соответственно. Породы данных серий представлены чередованием вулканогенных (преимущественно ультраосновных и основных) и вулканогенно-осадочных толщ, образовались в островодужных обстановках.

Возраст метапикритов пораярвинской серии - 1894 ± 40 млн. лет (Sm-Nd, по Скуфьин и др., 2009) или 1865 ± 58 (Rb-Sr, по Балашов, 1996). Возраст вулканитов томингской серии - 1870 ± 38 (Rb-Sr, по Mitrofanov et al., 1991). Метаморфизм вмещающих колчеданные руды пород ЮПСЗ проходил в условиях до амфиболитовой фации (Skufin, Theart, 2005; Скуфьин и др., 2009), Прихибинья - зеленосланцевой фации биотит-хлорит-актинолитовой субфации метаморфизма

(Имандра-Варзугская..., 1982). На контакте с Хибинским массивом породы ИВСЗ в результате контактового метаморфизма превращены в амфибол-пироксен-плагиоклазовые и пироксен-плагиоклазовые роговики (Горстка, 1971).



Рисунок 1. Расположение палеопротерозойского рифтогенного пояса ПИВ на территории Фенно-Скандинавского щита (по Melezhik, Sturt, 1994).

- 1 - пояс ПИВ; 2 - протерозойские гранитные массивы;
- 3 - палеозойские щелочные интрузивные комплексы.

По вещественному составу в колчеданных рудах Брагино (ЮПСЗ) выявлено три типа руд: пирротиновые I-го и II-го типов и пиритовые. Руды Прихибинья в целом аналогичны пирротиновым рудам II типа. Присутствие пирротина в качестве главного рудного минерала является одним из признаков метаморфических преобразований руд.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

1. Хром-скандий-ванадиевая минерализация является характерной для метаморфизованных колчеданных руд палеопротерозойских супракрустальных комплексов Кольского региона. Хром, скандий и ванадий в минеральных формах выступают как видообразующие элементы и входят в состав оксидных и силикатных минералов в качестве изоморфной примеси.

Таблица 1.

Основные минеральные формы Cr-Sc-V минерализации
в колчеданных рудах Кольского региона

Минерал	Формула	Б	П
<i>Оксиды</i>			
Карелианит	V_2O_3	-	+
Рутил	TiO_2	+	+
Ильменит	$FeTiO_3$	+	+
Кызылкумит	$Ti_2VO_5(OH)$	+	-
Шрейерит	$V_2Ti_3O_9$	+	-
Тиванит	$TiVO_3(OH)$	+	-
Бирудит	$(Be, \square)(V^{3+}, Ti)_3O_6$	+	-
Ноланит	$(V^{3+}, Fe^{3+}, Fe^{2+}, Ti)_{10}O_{14}(OH)_2$	+	-
Хромит	$FeCr_2O_4$	+	+
Кульсонит	FeV_2O_4	+	+
Магнетит	$FeFe_2O_4$	+	+
Кричтонит	$Sr(Mn, Y, U)Fe_2(Ti, Fe, Cr, V)_{18}(O, OH)_{38}$	+	-
Сенаит	$Pb(Mn, Y, U)(Fe, Zn)_2(Ti, Fe, Cr, V)_{18}(O, OH)_{38}$	+	-
Линдслейит	$(Ba, Sr)(Zr, Ca)(Fe, Mg)_2(Ti, Cr, Fe)_{18}O_{38}$	+	+
Ловерингит	$(Ca, REE)(Zr, Fe)(Mg, Fe)_2(Ti, Fe, Cr, Al)_{18}O_{38}$	-	+
Давидит-(La)	$La(Y, U)Fe_2(Ti, Fe, Cr, V)_{18}(O, OH, F)_{38}$	+	+
Давидит-(Ce)	$Ce(Y, U)Fe_2(Ti, Fe, Cr, V)_{18}(O, OH, F)_{38}$	+	+
<i>Силикаты</i>			
Голдманит	$Ca_3V^{3+}_2(SiO_4)_3$	-	+
Гроссуляр	$Ca_3Al_2(SiO_4)_3$	-	+
Титанит	$CaTi(SiO_4)O$	+	+
Мухинит	$Ca_2(Al_2V^{3+})(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)$	-	+
Ванадомухинит *	$Ca_2(V^{3+}_2 Al)(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)$	-	+
Алланит-(Ce)	$CaCe(Al_2Fe^{2+})(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)$	-	+
Ванадоалланит-(Ce)*	$CaCeV^{3+}AlFe^{2+}(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)$	+	-
Ванадоалланит-(Nd)*	$CaNdV^{3+}AlFe^{2+}(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)$	+	-
Тортвейтит	$Sc_2Si_2O_7$	+	-
Джервисит	$NaSc^{3+}Si_2O_6$	+	-
Роскоэлит	$KV^{3+}_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	+	-
Мусковит	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$	+	+
Флогопит	$KMg_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	+	-
Клинохлор	$Mg_5Al(AlSi_3O_{10})(OH)_8$	+	-
Шамозит	$(Fe^{2+}, Mg, Al, Fe^{3+})_6(Si, Al)_4O_{10}(OH, O)_8$	+	+
Брагиноит*	$(V, Al, Cr, Fe)_4(Si, Al)_4O_{10}(OH)_8$	+	-

Примечание. Б - Брагино, ЮПСЗ, данные автора; П - Прихибинье, данные по (Карпов и др., 2012а; Карпов и др., 2012б; Карпов и др., 2013б; Карпов и др., 2013в; Карпов и др., 2016). Жирным шрифтом выделены собственные минералы Cr, Sc и V. * фазы, которые не имеют на сегодняшний день статуса минерального вида. Прочерк - минерал не установлен.

В таблице 1 представлены основные минералы Cr-Sc-V типа минерализации, установленные в колчеданных рудах ЮПСЗ и ряде объектов в Прихибинье. Доминантное развитие получила именно ванадиевая составляющая.

Оксидная минерализация разделяется на три группы: первая - простые оксиды V - карелианит, вторая - Fe-V(Cr) оксиды и третья - Ti-V оксиды. Представители второй группы - хромит, сохранившийся в виде реликтов в кульсоните (Компанченко и др., 2017), кульсонит и ноланит. Третья группа - кызылкумит, шрейерит, тиванит, бирудит. Среди собственных силикатов ванадия установлены голдманит, мухинит и роскоэлит, а также несколько фаз - потенциально новых минеральных видов, которые требуют дальнейшего исследования ("брагиноит" - фаза V-Al-Si-O состава, "ванадоалланит-(Nd)", "ванадоалланит-(Ce)", "ванадомухинит").

В качестве примеси ванадий установлен в ильмените и рутиле (до 3 и 11 мас.% V_2O_3 соответственно), минералах группы кричтонита, (до 23 мас.% V_2O_3 и до 3 мас.% Sc_2O_3) (Карпов и др., 2016), в слюдах (мусковите (до 16 мас.% V_2O_3) и флогопите (до 5 мас.% V_2O_3)), хлоритах (шамозите (до 12 мас.% V_2O_3 , ранее в природе в таком количестве не отмечалась) и клинохлоре (до 3 мас.% V_2O_3)), титаните (до 5 мас.% VO_2) и др.

Впервые в колчеданных рудах региона выявлены собственные минеральные формы скандия - тортвейтит и джервисит, которые также содержат примесь ванадия (до 3 и 4 мас.% V_2O_3 соответственно).

Хром в оксидах (кроме группы шпинели) и силикатах встречается в качестве примеси и обычно его содержание не превышает 2-3 мас.% Cr_2O_3 .

2. Минералы хром-скандий-ванадиевой ассоциации образуют эволюционные ряды, отражающие эволюцию самих колчеданных руд. В колчеданных рудах Южной Печенги формирование таких рядов происходит в пределах определенной группы минералов (в результате широко проявленного изоморфизма), в Прихибинье - между разными классами минералов (в результате замещения оксидов силикатами).

В нашем случае, под термином «эволюционные ряды» мы понимаем последовательность минеральных видов, связанных пространственно и генетически, появление или исчезновение которых (или сохранность в виде

реликтов) характеризует определенную стадию эволюции вмещающих эти минералы пород.

В колчеданных рудах Брагино выявлено несколько эволюционных рядов Cr-Sc-V минерализации, но наиболее показательным и информативным в колчеданном проявлении Брагино является эволюционный ряд минералов группы шпинели **хромит**→**кульсонит**→**магнетит** (Компанченко и др., 2017).

Хромит FeCr_2O_4 - первичный минерал группы шпинели, сохранившийся в виде реликтов в кристаллах кульсонита в пирротиновых рудах II типа (рис. 2) (Компанченко и др., 2017).

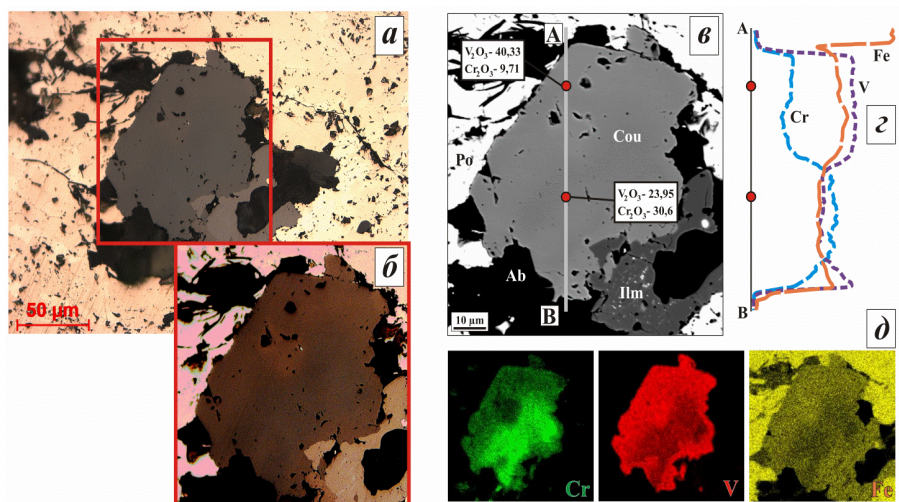


Рисунок 2. *а, б* - кристалл кульсонита с реликтом хромита в отраженном поляризованном свете с нормальной (*а*) и повышенной (*б*) контрастностью; *в* - кульсонит (Cou) с фазовой неоднородностью в ассоциации с ильменитом (Ilm) и альбитом (Ab) в пирротине (Po), BSE снимок, повышенная контрастность; *г* - распределение Cr, V и Fe по профилю АВ (содержания элементов в точках анализов в мас. %); *д* - карты распределения элементов в характеристических излучениях.

Реликты хромита выявляются уже при наблюдениях в отраженном поляризованном свете - разные части кристалла характеризуются разной отражательной способностью (рис. 2, *а, б*), и подтверждаются при наблюдении в характеристических излучениях Cr, V и Fe (рис. 3, *д*). Участки кристаллов с пониженным отражением, обычно в центральной части, обогащены Cr (рис. 2, *г*) и по

составу могут соответствовать хромиту. Среднее значение микротвердости для этого хромита, вычисленное по пяти измерениям, составили 464,8 кг/мм² (1278-1456 кг/мм² по Handbook), кривая спектрального отражения резко отличается от таковой для кульсонита и по конфигурации близка к хромиту. Находки хромшпинелидов в колчеданных рудах известны, например, на Урале (Зайков и др., 2002) и характерны для руд, связанных с ультрамафитами.

Полагается, что первичным минералом группы шпинели в колчеданных рудах Брагино является **хромит FeCr_2O_4** , который частично растворяется, обогащается ванадием в результате замещения последним хрома и переходит в другую минеральную форму - кульсонит. Данный хромит является единственным частично сохранившимся минералом первичных колчеданных руд и, по аналогии с рудами Урала, отражает связь колчеданных руд Брагино с ультраосновным магматизмом.

Кульсонит FeV_2O_4 - главный по распространенности минерал группы шпинели в колчеданных рудах Брагино. Он образует одиночные кристаллы октаэдрического габитуса и сростки размером от 10 μm до 500 μm . Внутреннее строение кристаллов кульсонита, установленного в сульфидах, наличие в них большого количества включений пирротина и других минеральных фаз в данной ассоциации позволяет рассматривать его индивиды как метакристаллы. Наиболее крупные метакристаллы встречены в массивных пирротиновых рудах I типа. Стоит отметить, что на тройных диаграммах распределения катионов в структурных позициях *A* и *B* (согласно идеальной формуле шпинелидов $AB_2\text{O}_4$, и принимая, что кульсонит - нормальная шпинель), кульсонит из массивных пирротиновых руд I типа четко отделяется от остальных (рис. 3).

Кульсонит находится в тесном сростании с ильменитом, рутилом, минералами группы кричтонита. Часто в сростаниях кульсонита и ильменита в последнем содержится тонкая вкрапленность ферберита (рис. 2, в), а в рутиле выявлены повышенные содержания WO_3 (от 2 до 10 мас.%).

Постоянное присутствие цинка в химическом составе кульсонита показывает, что его образование в результате метаморфических преобразований руд шло одновременно с преобразованием сфалерита и перераспределением цинка (рис. 3, а).

Согласно данным (Молошаг и др., 2004; Spry, Scott, 1986) в колчеданных пирротиновых рудах, залегающих в породах, метаморфизованных до уровня амфиболитовой фации, происходят не только преобразования сульфидов железа, но и изменения минеральных форм нахождения некоторых других элементов, в том числе цинка.

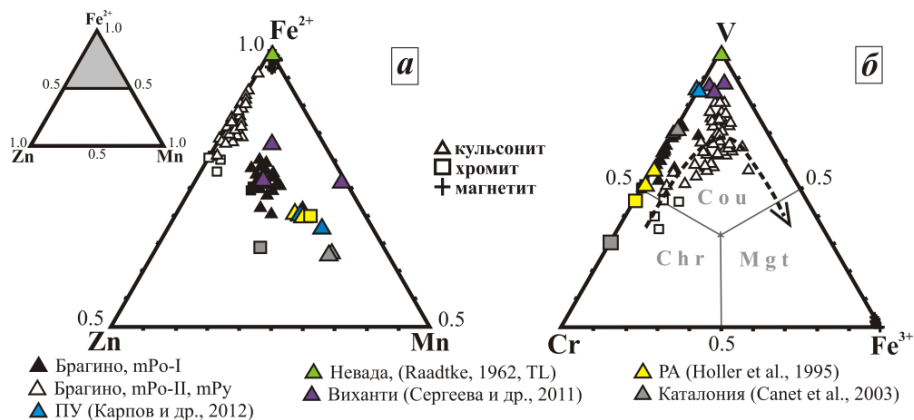


Рисунок 3. Тройные диаграммы распределения катионов в шпинелидах **а** - в структурной позиции *A* (соответствует закрашенной области на малом треугольнике), в координатах Zn - Fe²⁺ - Mn; **б** - в структурной позиции *B* в координатах Cr - V - Fe³⁺ (Chr - хромит; Cou - кульсонит; Mgt - магнетит). Стрелка - направление эволюции минералов группы шпинели. ПУ - Пирроотиновое ущелье РА - Рампура Агуча.

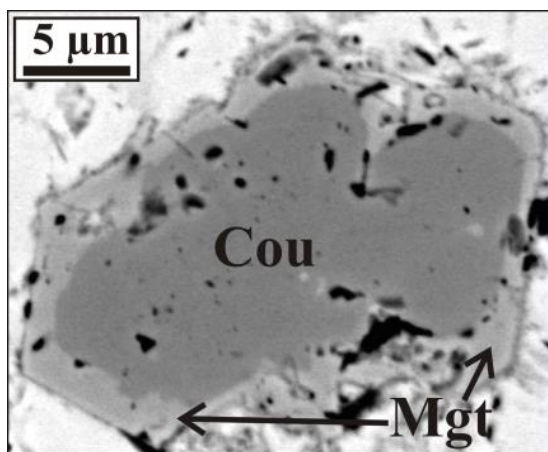


Рисунок 4. Кайма магнетита (Mgt) вокруг частично растворенного кристалла кульсонита (Cou) в марказит-пирроотиновом агрегате. Снимок в обратно-рассеянных электронах.

Магнетит FeFe_2O_4 наблюдается в виде краевых зон кристаллов кульсонита. Толщина зон изменяется от нескольких микрон вплоть до полного замещения кульсонита (рис. 4). Промежуточные фазы между минералами не наблюдается, границы четкие. В качестве примесей в магнетите присутствует V_2O_3 до 1%, а также следы Cr, Zn, Si, Mn.

Появление магнетита характеризует завершающую стадию эволюции минералов группы шпинели и указывает на возрастание потенциала железа.

В колчеданных рудах Прихобины, по данным Карпова С.М. и соавторов (Карпов и др., 2013б) эволюционные ряды представлены последовательной сменой оксидов ванадия силикатами. В целом, ряд можно записать следующим образом: (карелианит/кульсонит) → «ванадомухинит» → мухинит → голдманит → (гроссуляр + диопсид).

Центральную часть агрегатов обычно занимают реликты карелианита или сильно корродированные кристаллы кульсонита. Вокруг оксидов образуется зона, сложенная минералом группы эпидота, в котором содержание V_2O_3 достигает 20 мас. % (назван «ванадомухинит», не имеет статуса нового минерального вида), а краевая часть сложена мухинитом или голдманитом.

Образование ванадиевой минерализации характеризует следующие этапы эволюции колчеданных руд Прихобины (Карпов и др., 2013б): 1) образование первичных оксидов ванадия - карелианита и кульсонита при региональном метаморфизме; 2) развитие ванадиевых и ванадийсодержащих кальциевых силикатов и оксидов, пространственно и генетически тесно связанных с оксидами ванадия, в результате контактового метаморфизма и метасоматоза под действием крупного Хибинского щелочного массива.

Установленные в колчеданных рудах Прихобины минералы группы кричтонита (Карпов и др., 2016), по аналогии с Брагино, отличаются значительными содержаниями V_2O_3 и Sc_2O_3 , что указывает на дополнительный привнос ванадия и скандия в результате гидротермальной активности и в Прихобины.

3. Эволюция хром-скандий-ванадиевой минерализации происходила в результате воздействия двух наложенных процессов минералообразования - метаморфического и гидротермального.

Положение о воздействии минимум двух процессов минералообразования, сформировавших Cr-Sc-V тип минерализации, было сформулировано на основе собственных наблюдений и в результате проведенного анализа литературы.

Признаки метаморфизма:

- Степень метаморфических преобразований вмещающих комплексов (от зеленосланцевой до амфиболитовой);
- Обширная пирротинизация колчеданных руд Кольского региона (с возрастанием степени метаморфизма растет содержание пирротина в рудах);

- Развитие метаморфического пирита, для которого характерны высокая микротвердость, отсутствие скрытой зональности после травления, наличие ориентированных включений нерудных минералов;
- Морфология многих минералов руд - развитие в виде метакристаллов (рис. 5).

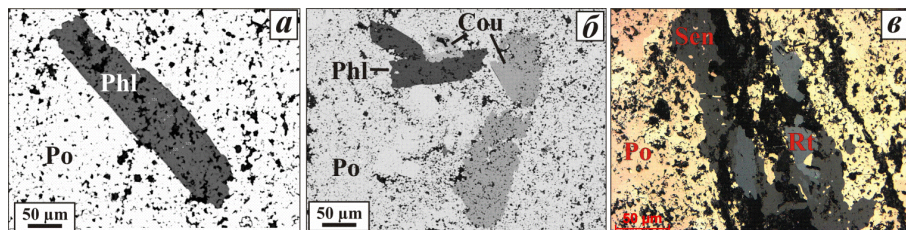


Рисунок 5. Морфология минералов в массивных пирротиновых рудах I типа: *а* - метакристалл флогопита (Phl) в массе пирротина (Po); *б* - метакристаллы кульсонита (Cou) и флогопита в пирротине; *в* - метакристаллы сенаита (Sen) в сростании с рутилом (Rt) в пирротине. *а,б* - снимки в BSE, *в* - снимок в отраженном поляризованном свете.

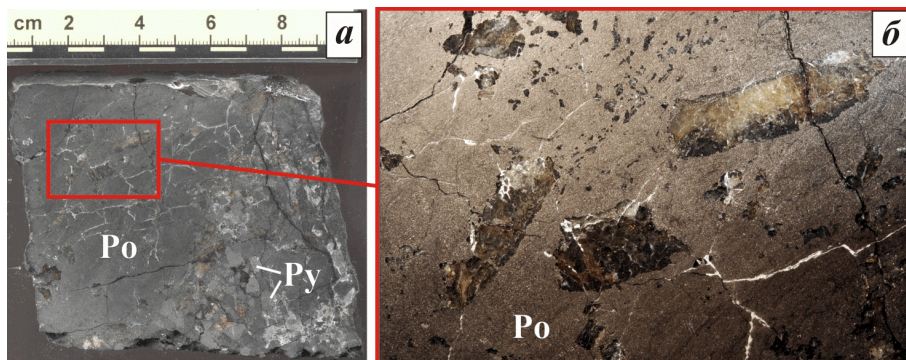


Рисунок 6. Реликты кварц-альбитовых прожилков в пирротиновой руде II типа: *а* - общий вид, (Py - кристаллы пирита); *б* - выделенный фрагмент. Полированный образец. Белый минерал по трещинам - роценит.

Признаки гидротермальной проработки:

- Реликты прожилков кварц-альбитового состава (рис. 6), содержат Cr-Sc-V минерализацию;

- Само присутствие скандиевой минерализации, характерной для объектов гидротермально-метасоматического генезиса;

- Минеральные формы Nb, W, Sn (рутил, ферберит, шеелит, бирудит и др.), встречающиеся совместно с Cr-Sc-V минерализацией и характерных для золоторудных месторождений гидротермально-метасоматического генезиса.

Сравнительный анализ. Для сравнительного анализа были выбраны ряд объектов, в которых установлена Cr-Sc-V минерализация (Kompanchenko et al., 2018). Все перечисленные объекты локализуются в протерозойских зеленокаменных структурах, вмещающие их комплексы были метаморфизованы в условиях, близких к амфиболитовой фации: Виханти (Сергеева и др., 2011) и Оутокумпу (Long et al., 1963), Финляндия; Сатра, Швеция (Zakrzewski et al., 1982); Рампура Агуча, Индия (Holler et al., 1995); Дэдхорс Крик, Канада (Potter et al., 2005) и Бигтеярви, Норвегия (Olerud, 1988). Сравнение Cr-Sc-V минерализации в колчеданных рудах Кольского региона с ними позволило выявить:

1. Условно, объекты, можно разделить на две группы. *Первая группа* - месторождения колчеданных руд, где проявилась только Cr-V минерализация, о скандии нет данных. Сюда можно отнести колчеданные руды месторождений Виханти и Оутокумпу, Сатра, Рампура Агуча. *Вторая группа* - объекты, где проявилась Cr-Sc-V минерализация. Сюда относятся комплекс вулканокластических брекчий Дэдхорс Крик, альбитовые фельзиты месторождения Бигтеярви и колчеданные руды Кольского региона.

2. Согласно литературным данным, Cr-V минерализация первой группы образовалась в результате метаморфических преобразований первично обогащенных ванадием и хромом толщ. Источником элементов для образования Cr-Sc-V минерализации второй группы (Дэдхорс Крик и Бигтеярви), считаются гидротермальные растворы, происхождение которых, однако, остается неизвестным.

3. Колчеданные руды Кольского региона, по развитию минеральных форм Cr, Sc и V, стоит между первой и второй группами. В рудах есть и оксидные формы V и Cr, характерные для первой группы, а также оксидные и силикатные формы Cr, V и Sc, установленные во второй. Из этого сделан вывод, что в становлении Cr-Sc-V минерализации в колчеданных рудах Кольского региона принимали участие как метаморфические преобразования первично обогащенных ванадием пород и руд, а также поступление этих элементов с гидротермальными растворами, курсирующими по разломам и трещинам (Kompanchenko et al., 2018).

Присутствие ванадиевой минерализации, практически аналогичной в ПИВ, характерно также для некоторых крупнейших золоторудных месторождений мира - Биг Белл, Калгурли, Хемло (Scott et al., 2007; Scott et al., 2011; Urban et al., 1992), которые локализованы в древних зеленокаменных поясах. Это может косвенным образом указывать на перспективность обнаружения крупных рудопроявлений золота в полосе Печенга-Имандра-Варзуга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В метаморфизованных пирротиновых колчеданных рудах Кольского региона, приуроченных к палеопротерозойскому рифтогенному поясу Печенга-Имандра-Варзуга, получил развитие необычный тип минерализации - хром-скандий-ванадиевый. В колчеданных рудах Южной Печенги он установлен автором впервые.

В результате проведенных детальных минералогических исследований в колчеданных рудах проявления Брагино (ЮПСЗ) установлен ряд минералов хрома, скандия и ванадия, где эти элементы играют видообразующую роль или входят в состав минералов в качестве примеси.

Минералы Cr-Sc-V типа минерализации характеризуются широко проявленным изоморфизмом, где хром, скандий и ванадий, совместно с рядом других элементов, могут замещать друг друга в оксидных и силикатных фазах с образованием внутрифазовой, а в некоторых случаях фазовой неоднородности.

В колчеданных рудах Кольского региона выявлены эволюционные ряды минералов, наиболее полно характеризующие этапы эволюции самих руд. В колчеданном проявлении Брагино это ряд минералов группы шпинели: хромит→кульсонит→магнетит. При этом, обнаружение реликтов хромита внутри кристаллов кульсонита, а также повышенные содержания цинка в этих минералах могут указывать на их генетическую позицию: связь колчеданообразования с ультраосновным магматизмом и преобразованием богатых сфалеритом первичных руд соответственно. В рудах Прихибинья эволюционный ряд выглядит следующим образом: (карелианит/кульсонит) →«ванадомухинит»→мухинит→голдманит→ (гроссуляр+диопсид). Образование оксидов ванадия происходило на этапе регионального метаморфизма руд, силикатов - в результате более позднего контактово-метасоматического воздействия на руды Хибинской щелочной интрузии.

Морфология и ассоциация некоторых минералов и эволюционные ряды позволяют говорить о двух наложенных процессах минералообразования, сформировавших необычный Cr-Sc-V тип минерализации в колчеданных рудах Кольского региона. Широкая пирротинизация, морфология некоторых минералов и особенности их химического состава говорят о большой роли метаморфических преобразований колчеданных руд, а обнаружение реликтов гидротермальных прожилков, вмещающих в себе данный тип минерализации, присутствие в минералах таких элементов, как W, Nb, Sn и др, указывают на гидротермальную проработку руд.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России:

1. **Kompanchenko, A.A.**, Voloshin, A.V., Balagansky, V.V. Vanadium Mineralization in the Kola Region, Fennoscandian Shield// *Minerals*. 2018. 11(8). 474.

2. **Компанченко А.А.**, Волошин А.В., Базай А.В., Полеховский Ю.С. Эволюция хром-ванадиевой минерализации в колчеданных рудах участка Брагино Южно-Печенгской структурной зоны (Кольский регион) на примере шпинелидов// *Записки РМО*. 2017. №5. С. 44-59.

3. **Компанченко А.А.**, Волошин А.В., Сидоров М.Ю. Минералы Fe в зоне окисления колчеданных руд Южно-Печенгской структурной зоны, Кольский регион: идентификация методом рамановской спектроскопии// *Вестник МГТУ*. 2017. Т. 20. № 1. С. 95-103.

4. Карпов С.М., Волошин А.В., **Компанченко А.А.**, Савченко Е.Э., Базай А.В. Минералы группы кричтонита в колчеданных рудах и рудных метасоматитах протерозойских структур Кольского региона// *Записки РМО*. 2016. № 5. С. 39-56.

В прочих изданиях:

5. **Компанченко А.А.**, Волошин А.В., Базай А.В. Cr-Sc-V минерализация в колчеданных рудах Южной Печенги, Кольский Регион// *Вопросы естествознания*. 2018. №3(17). С. 70-76.

6. **Компанченко А.А.** Необычные минеральные ассоциации и минеральные формы Sc и W в колчеданных рудах Южной Печенги, Кольский регион// *Металлогения древних и современных океанов*. 2018. №24. С. 111-115.

7. **Компанченко А.А.** Хром-скандий ванадиевая минерализация в колчеданных рудах палеопротерозойских супракрустальных комплексов Кольского региона// *Металлогения древних и современных океанов*. 2018. №24. С. 108-111.

8. **Компанченко А.А.**, Волошин А.В., Базай А.В. Минералы Y-Ln в колчеданных рудах проявления Брагино, Южная Печенга, Кольский регион// *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2018. №15. С. 209-212.

9. Волошин А.В., **Компанченко А.А.** Новые данные о минералах. Выпуск 4. Первые находки в России и в Кольском регионе// *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2018. №15. С. 95-102.

10. **Компанченко А.А.**, Волошин А.В. Минеральные формы V, Cr, Ti и Sc в протерозойских колчеданных проявлениях Кольского региона// *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2017. №14. С. 117-120.

11. Волошин А.В., **Компанченко А.А.**, Карпов С.М., Борисова В.В. Новые данные о минералах. Вып. 3. Первые находки в России и в Кольском регионе// *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2017. №14. С. 71-77.

12. **Компанченко А. А.** Ст-Ti-V минералы в протерозойских колчеданных рудах Южно-Печенгской структурной зоны, Кольский регион // Металлогения древних и современных океанов. 2016. №22. С. 116-121.

13. **Компанченко А.А.**, Сидоров М.Ю., Волошин А.В. Рамановская спектроскопия - метод диагностики микровыделений минералов// Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2016. №13. С.275-279.

14. **Компанченко А.А.**, Волошин А.В., Базай А.В. Минералы группы шпинели в метаморфизованных колчеданных рудах Южно-Печенгской структурной зоны, Кольский регион// Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2016. №13. С. 279-282.

15. Волошин А.В., Сидоров М.Ю., **Компанченко А.А.**, Чернявский А.В. Новые данные о минералах П. Первые находки в России и в Кольском регионе// Труды XIII Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2016. №13. С. 240-246.

16. **Компанченко А.А.**, Волошин А.В., Базай А.В. Новые данные о минералах Ti- Fe-V ветви минерализации в колчеданных рудах Южной Печенги, Кольский регион// Материалы Юбилейного съезда Российского минералогического общества «200 лет РМО». СПб. 2017. С. 239-241.

17. **Компанченко А.А.**, Волошин А.В., Базай А.В. Новые данные ванадиевой и скандиевой минерализации в колчеданных рудах Южной Печенги, Кольский регион// Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии. XXVIII Молодёжная научная конференция памяти К.О. Кратца. - СПб.: Изд-во ВВМ. 2017. С. 116-119.

18. **Компанченко А.А.**, Волошин А.В., Базай А.В. V-Ti оксиды в колчеданных рудах Южно-Печенгской структурной зоны, Кольский регион// Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северо-Запада России. Материалы XXVII молодёжной научной школы-конференции, посвящённой памяти члена-корреспондента АН СССР К. О. Кратца и академика РАН Ф. П. Митрофанова. Апатиты. 2016. С. 95-97.

19. **Kompanchenko A.A.**, Voloshin A.V., Sidorov M.Yu. Minerals of Fe in oxidation zone of massive sulfide ore - identification by Raman spectroscopy//XII International Conference "GeoRaman-2016", Abstract Volume: Abstract of the XII International Conference "GeoRaman-2016"/ Russian Academy of Science, Siberian Branch, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy. – Novosibirsk: Publishing "OFSET", 2016. P. 106.

20. **Kompanchenko Alena**, Voloshin Anatoly, Bazai Aya. (2016): Minerals of spinel group in massive sulfide of the Kola region//The 8th International Siberian Early Career GeoScientists Conference: Proceedings of the Conference. Novosibirsk. P. 149-150.

21. **Компанченко А.А.**, Волошин А.В., Базай А.В. Ванадиевая минерализация в колчеданных проявлениях - новый тип для Южно-Печенгской структурной зоны, Кольский регион// Месторождения стратегических металлов: закономерности

размещения, источники вещества, условия и механизмы образования. Материалы конференции. 2015. С. 325-326.

22. **Компанченко А.А., Волошин А.В., Базай А.В.** Cr-V минералы группы шпинели в колчеданных проявлениях Южно-Печенгской структурной зоны, Кольский регион// Минералогия во всем пространстве сего слова. Материалы XII Съезда Российского минералогического общества. 2015. С. 162-164.

23. **Компанченко А.А., Волошин А.В., Базай А.В.** Ванадийсодержащие минералы группы кричтонита в колчеданных проявлениях Южно-Печенгской структурной зоны, Кольский регион// Актуальные проблемы геологии докембрия, геофизики и геоэкологии. Материалы XXVI молодежной научной школы-конференции, посвящённой памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова. 2015. С. 57-60.

24. **Компанченко А.А., Волошин А.В., Базай А.В.** Ванадиевая минерализация в колчеданных рудах участка Брагино (Южно-Печенгская структурная зона)// Проблемы арктического региона: Тезисы докладов XV международной научной конференции студентов и аспирантов (г. Мурманск, май 2015 г.). – Мурманск: ММБИ КНЦ РАН. 2015. С. 33-34.

Автореферат

Компанченко Алёна Аркадьевна

ХРОМ-СКАНДИЙ-ВАНАДИЕВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ
В КОЛЧЕДАННЫХ РУДАХ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ
СУПРАКРУСТАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ
КОЛЬСКОГО РЕГИОНА

Технический редактор В.Ю. Жиганов

Подписано к печати 18.12.2018. Формат бумаги 60х84 1/16.
Усл. печ. л. 1,16. Заказ № 5. Тираж 100 экз.
ФГБУН ФИЦ КНЦ РАН
184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14