

На правах рукописи



НИКИФОРОВ Александр Геннадьевич

**ГЕОЛОГИЯ И ФАКТОРЫ КОНТРОЛЯ КОМПЛЕКСНЫХ ГРАНАТОВЫХ РУД
МЕСТОРОЖДЕНИЯ "ВЫСОТА-181"
(СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ)**

Специальность: 25.00.11 - геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых,
минералогия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва - 2020

Работа выполнена в Институте геологии - обособленном подразделении Федерального государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Карельский научный центр Российской академии наук"

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук, **Щипцов Владимир Владимирович**, Институт геологии - обособленное подразделение Федерального государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Карельский научный центр Российской академии наук", старший научный сотрудник, профессор ПетрГУ

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук, **Войтеховский Юрий Леонидович**, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», профессор, заведующий кафедрой минералогии, кристаллографии и петрографии

кандидат геолого-минералогических наук, **Мелентьев Гелий Борисович**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), старший научный сотрудник отдела №10 - проблем теплоэнергетики

Ведущая организация: Геологический институт - Обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ГИ КНЦ РАН)

Защита состоится «11» ноября 2020 г. в 11-00 часов на заседании диссертационного совета 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 и на сайте www.igem.ru. Сведения о защите, электронные версии диссертации и автореферата доступны на официальных сайтах ВАК при Министерстве образования и науки РФ (www.vak.ed.gov.ru).

Автореферат разослан «___» августа 2020 г.

Ученый секретарь



диссертационного совета к.г.-м.н.

Чефранова А. В.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

В настоящее время страны - лидеры научно-технического прогресса (США, ЕС и др.) в высокотехнологичном производстве и наукоемких технологиях используют ряд нетрадиционных металлов и промышленных минералов [Баранов, 2009; Buchert et al, 2009; Современные методы..., 2012; Campbell et al, 2014; др]. Промышленными (или индустриальными) принято называть минералы, обладающие специфическими физическими и химическими свойствами, которые позволяют использовать их в промышленности непосредственно после добычи или обогащения. Экономика промышленных минералов такова, что они составляют 60% всего добытого минерального сырья и представляют 40% от стоимости общего твердого сырья [Kuzvart, 2006; Mineral commodity summaries, 2020]. Изучение месторождений промышленных минералов актуально для территории Карельской части Фенноскандинавского щита [Щипцов, 2006], обладающей значительным сырьевым потенциалом более тридцати видов промышленных минералов. На рубеже веков минерагенические исследования региона сфокусировались на наиболее перспективных темах: благородных металлах и новых видах промышленных минералов [Industrial Minerals of Karelia, 1993; Металлогения Карелии, 1999; Недра Северо-Запада, 2003; Кварцевое сырье Карелии, 2004; Минерально-сырьевая база..., 2006; Гранатовые руды..., 2009; Золото и платина Карелии, 2011; Кианитовые руды 2009; и др.]

Одним из перспективных промышленных минералов является гранат. Известность гранат получил за счет использования в ювелирном деле более трех тысячелетий назад, в современной обстановке области его использования интенсивно расширяются [Mineral commodity summaries, 2020]. Сферы его использования отличаются разнообразием: пескоструйный материал для гранения и резки с использованием современного оборудования (jet-technology), материал для очистки форм для отливок, высококачественный абразив, мультисредные фильтрационные системы при очистке воды и нефти и др. [Гранатовые руды..., 2009]. Производство гранатового концентрата в мире растет и составляет 1,2 млн. т. (по состоянию на 2019 г.), увеличившись в восемь раз за последние двадцать лет. Ведущими производителями гранатовой продукции по данным USGS являются Китай, Австралия, ЮАР и Индия [Mineral commodity summaries, 2020].

Минерально-сырьевой потенциал гранатовых руд пироп-альмандинового состава в значительной степени связывается с Лоухским районом Республики Карелия, относящимся к арктической зоне Российской Федерации. Одним из ключевых рудных объектов данного района является месторождение «Высота-181», по степени доступности и оцененным ресурсам способное занять достойное место в мировой иерархии промышленных месторождений гранатовых руд.

Руды месторождения связаны с метаморфогенно-метасоматическими комплексами и характеризуются совместным нахождением нескольких видов промышленных минералов. В связи с этим становятся актуальными проблемы минерагенического изучения руд, с дальнейшей оценкой возможности их эффективного и безопасного использования в зависимости от потребности в гранатовом сырье и достигнутого технологического уровня. Оценка выявленных руд должна быть комплексной, что связано с требованиями экологической безопасности и увеличением инвестиционной привлекательности месторождения [Современные проблемы комплексной..., 2017; Чантурия, Козлов, 2017 и др.]

Цель работы:

Охарактеризовать особенности геологии и факторы контроля комплексных гранатовых руд месторождения «Высота-181»

Основные задачи исследования:

1. Установить последовательность геологических событий, определивших формирование гранатовых руд на месторождении «Высота-181» и их связь с общей схемой эволюции Хизоваарской структуры Тикшеозерской гранит-зеленокаменной области.

2. Изучить особенности проявления метаморфических и метасоматических процессов при образовании политипных руд.
3. Определить последовательность минерагенических процессов в геохронологическом интервале «неоархей-палеопротерозой».
4. Выявить факторы контроля рудообразования комплексных руд.
5. Показать пространственную связь рудных тел с вмещающими метаморфическими породами.
6. Охарактеризовать особенности минералого-технологических исследований метаморфогенно-метасоматических комплексов на примере гранатовых руд месторождения «Высота-181».

Фактический материал и методы исследования:

Исследования, описанные в диссертационной работе, основаны на фактическом материале (более 200 образцов и 22 малые технологические пробы (МТП)), который был собран автором в результате полевых работ в составе отрядов Института геологии КарНЦ РАН в 2012, 2013 и 2014 годах. Дополнительный каменный и аналитический материал, в том числе МТП и шлифы были предоставлены автору для изучения сотрудниками ИГ КарНЦ РАН: Щипцовым В.В., Фроловым П. В., Бубновой Т. П., Скамницкой Л. С.

Автором выполнено петрографическое исследование пород (132 шлифов), минералогический и рентгено-флуоресцентный анализы (на спектрометре ARL ADVANTX в центре коллективного пользования ИГ КарНЦ РАН). Изучен состав минералов и их химическая зональность (33 аншлифа, анализ выполнялся на СЭМ VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments)).

Дополнительно проводилось определение содержания элементов-примесей в монофракциях граната (5 шт.) методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (квадрупольный масс-спектрометр X-Series-2), по методике, описанной в работе [Светов и др., 2015].

Для определения РТ параметров использовался программный комплекс TWQ [Berman, Aranovich, 1996; Aranovich, Berman, 1996] и приложения TWQ_Comb, TWQ_View Д. В. Доливо-Добровольского (ИГГД РАН). Обозначения минералов приводятся согласно [Recommendations by the IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks, 2007].

Научная новизна:

1. Выделены три группы метаморфических пород, среди которых наибольшее практическое значение имеют гранат-биотитовые и амфибол-биотитовые гнейсы, сохранные в виде субстратов, и связанные с ними метасоматиты.
2. Установлены политипные и полихронные метасоматиты, развитые по различному субстрату и характеризующиеся высокими содержаниями граната и кианита, а также присутствием ставролита и мусковита, что позволяет отнести данные образования к комплексным рудам.
3. Впервые выявлены литолого-стратиграфические, структурные и метаморфогенно-метасоматические факторы контроля комплексных руд Хизоваарского рудного поля на примере месторождения гранатовых руд «Высота-181».
4. Определена связь природных гранатовых и природных комплексных руд в метаморфических и метасоматических вмещающих породах.
5. Определены минералого-технологические свойства комплексных гранатовых руд, что позволяет существенно усовершенствовать ранее разработанную схему их обогащения с получением нескольких минеральных продуктов (минеральных концентратов).

Защищаемые положения:

1. Месторождение «Высота-181» связано со структурно-вещественными комплексами осадочно-вулканогенной стратотектонической ассоциации Хизоваарской структуры Тикшеозерской гранит-зеленокаменной области, палеогеодинамические события в пределах которых привели к формированию руд граната и попутных промышленных минералов.

2. Формирование и локализация комплексных гранатовых руд месторождения «Высота-181» определяется сочетанием литолого-стратиграфических, метаморфогенно-метасоматических и структурных факторов контроля.

3. На месторождении «Высота-181» выявлены три природных типа гранатовых руд, отличающихся по составу, кристалломорфологии граната, пространственному положению пород и характеристикам попутных полезных компонентов и три природных типа комплексных руд.

Практическая значимость:

1. Полученные материалы по геологическому строению месторождения «Высота 181» позволяют оценить руды данного объекта как комплексные с учетом совместного присутствия руд граната, кианита, ставролита и мусковита.

2. Выделены природные типы комплексных руд и подсчитаны их ресурсы.

3. Установлено, что минерально-сырьевой потенциал гранатовых руд альмандинового состава в значительной степени связывается с месторождением «Высота-181», которое по результатам проведенных исследований имеет полное основание относится к наиболее изученным и подготовленным к использованию в регионе.

Апробация работы:

Основные положения диссертации опубликованы в 13 печатных работах, включая 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Результаты работы докладывались на международных и Российских конференциях и совещаниях: International conference «The Arctic Days. Mineral Resources» - Tromse: Geological Survey of Norway, 2014; 66, 67, 68 научных школах-конференциях молодых ученых «Науки о земле: задачи молодых» (Петрозаводск, 2013–2015 гг.); Международном совещании «Плаксинские чтения — 2013», Томск; XXV молодежной научной конференции, посвященной памяти чл.-корр. АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова, "Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии северо-запада России" Санкт-Петербург, 2014 г.; IX Российском семинаре по технологической минералогии «Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений» (Магнитогорск, 2014 г.); X Российском семинаре по технологической минералогии «Роль технологической минералогии в получении конечных продуктов передела минерального сырья» (Белгород, 2015 г.); XX Международном симпозиуме студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова, посвященном 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. Томск, 2016; 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2016 (Албена, Болгария, 2016); XIII Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле», Москва. МГРИ-РГГРУ, 2017. 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2018 (Албена, Болгария, 2018);

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю д.г.-м.н. В.В. Щипцову за всестороннюю помощь, оказанную при проведении полевых работ, исследований и во время написания диссертационной работы.

Автор признателен сотрудникам ИГ КарНЦ РАН: П. В. Фролову, Т. П. Бубновой, Л. С. Скамницкой, А. М. Ручьеву за совместную плодотворную работу, д.г.-м.н. С. А. Светову, д.г.-м.н. О. И. Володичеву, к.г.-м.н. В. И. Иващенко и к.г.-м.н. О. С. Сибелеву за консультации по вопросам геологии, петрологии, а также за конструктивную критику и ценные замечания; к.т.н. В.И. Кевличу, С. Ю. Ткачевой, Н. Р. Тигушкиной, Ю. Л. Кюлленену за минералогические исследования и пробоподготовку; сотрудникам аналитического центра: А.Н. Терновому, А.Н. Сафронову, к.х.н. С.В. Бурдюху, И.С. Ининой, А.С. Парамонову.

Автор также выражает искреннюю благодарность сотрудникам Института геологии и геохронологии докембрия РАН: к.г.-м.н. П. Я. Азимову за важные консультации по петрографии и петрологии метаморфических и метасоматических пород, к.г.-м.н. С. А. Бушмину за консультации при подготовке статьи по материалам диссертации и конструктивную критику.

Работа выполнена в рамках исследований по Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы, раздел VIII «Науки о Земле» и планом НИР ИГ КарНЦ РАН по теме №204 «Научное обоснование потенциала георесурсов нетрадиционных и новых промышленных минералов и горных пород Карелии при их комплексной оценке (ГР № АААА-А16-1160204410115-2) и теме №210 «Минерагения, технологическая и эколого-экономическая оценка потенциальных минерально-сырьевых ресурсов территории Республики Карелия» (ГР № АААА-А18-118020290175-2).

Личный вклад.

Автор лично инициировал либо осуществлял все этапы данного исследования, от сбора фактического материала в ходе полевых работ (включая детальное изучение геологического строения месторождения «Высота-181» и других объектов Хизоваарского рудного поля, картирование, отбор проб), до лабораторных и технологических исследований. Он также проводил обработку и научную интерпретацию полученных результатов, осуществлял статистические расчеты и моделирование.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 151 странице машинописного текста и состоит из введения, шести глав и заключения; включает 66 иллюстраций, 17 таблиц и списка литературы из 147 наименований.

Основное содержание работы

В первой главе рассмотрена история и различные подходы к изучению Хизоваарской структуры и, локализованного в его пределах, Хизоваарского рудного поля. Информация, представленная в первой главе, основана на архивных сведениях и литературных источниках. Во второй главе охарактеризовано геологическое строение Тикшеозерской гранит-зеленокаменной области и Хизоваарской структуры, описан ее стратиграфический разрез, этапы метаморфизма и регионального метасоматоза. Данные приводятся на основании литературных источников. В третьей главе дана геологическая характеристика месторождения «Высота-181», сформированная на основе фактического материала автора и с использованием материалов сотрудников Отдела минерального сырья ИГ КарНЦ РАН. Дана петрографическая характеристика пород субстрата и развитых по ним метасоматитов. Приведены доказательства связи оруденения с метаморфизованными породами осадочно-вулканогенной страто-тектонической ассоциации (СТА). В четвертой главе проанализированы литолого-стратиграфические, метаморфогенно-метасоматические и структурные факторы контроля руд. Приведены доказательства связи рудогенеза и метасоматических процессов на фоне регионального свекофеннского метаморфизма. В пятой главе обоснованы природные типы руд промышленных минералов (граната, кианита, мусковита и ставролита) изучаемого месторождения на основе минералогической и геохимической характеристики. Обосновано существование трех природных типов гранатовых руд, формирование которых связано с различными этапами метаморфизма и метасоматоза. В шестой главе приведена методика и результаты минералогического картирования месторождения. На основе минералогического анализа выделены природные типы комплексных руд, доказана их уникальная специализация. Представлены результаты пробного обогащения, на основании которых выделены технологические типы руд месторождения. В заключении сформулированы главные результаты диссертационного исследования.

Первое защищаемое положение:

Месторождение «Высота-181» связано со структурно-вещественными комплексами осадочно-вулканогенной стратотектонической ассоциации Хизоваарской структуры Тикшеозерской гранит-зеленокаменной области, палеогеодинамические события в пределах которых привели к формированию руд граната и попутных промышленных минералов.

Хизоваарская структура является составляющей частью зеленокаменного пояса Тикшеозерской гранит-зеленокаменной области (ТГЗО в дальнейшем), предположительно проторифтогенного генезиса, сформировавшейся в позднеархейское время на границе

Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса (рис. 1). Супракрустальная часть ТГЗО простирается в виде извилистой (вытянутой в северо-западном направлении на более чем 120 км при ширине до 25 км) структуры. Извилистость границ объясняется интенсивной гранитизацией позднелопийского возраста и различиями в величине эрозионного среза [Корсакова, 2000]. Основанием ТГЗО является раннеархейский гранитный комплекс, включающий разгнейсованные и мигматизированные разновидности гранитов и плагиогранитов, кварцевые диориты, тоналиты [Государственная геологическая карта, 2012]. Супракрустальная часть ТГЗО сложена стратифицированными породами позднеархейского возраста (метаморфизованные вулканиты, вулканогенно-осадочные и осадочные породы основного, среднего и кислого состава). В пределах ТГЗО проявлены также позднеархейские и раннепротерозойские интрузивные образования.

Хизоваарская осадочно-вулканогенная структура представляет собой синклиналиную складку с субширотным шарниром [Кожевников и др., 2005] и принадлежит к супракрустальной части ТГЗО, ее границы определены в районе озера Верхнее (Лоухский район Республики Карелия).

Породы Хизоваарской структуры четко стратифицированы в Северном фланге. В строении принимают участие 4 стратотектонических ассоциации [Кожевников и др., 2005], сформировавшихся в разных тектонических условиях и сложенных разными по химическому составу и физико-механическим характеристикам породами. Нижняя часть разреза представлена вулканитами (СТА-1) и выполнена породами ультраосновного состава, переслаивающимися с толеитовыми базальтами. Возраст толщ по верхней границе оценивается как 2804 ± 27 млн. лет по результатам U-Pb изотопной датирования по цирконам [Бибикова и др., 2003]. Следующая крупная стратиграфическая единица (СТА-2) представлена вулканогенными и терригенными породами среднего и основного состава. В основании толщ залегают андезиты, выше проявлены осадочно-вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы (двусланцевыми сланцы и амфибол-биотитовые сланцы), являющихся рудоконтролирующими для руд неметаллических ПИ: кианита, граната, мусковита и других [Кианитовое поле., 1988]. Выше по разрезу залегают породы СТА-3 и СТА-4, представленные метадацитами, метариолитами, грубообломочными вулканитами (конгломератами и туфами) и metabазальтами. Для Южного фланга Хизоваарской структуры выделялась Южная СТА, предположительно сложенная слабо расчлененными породами СТА-2 и СТА-3 [Кожевников, 2000].

Геологическое строение Хизоваарской структуры и сопряженных территорий отражено на рис. 2.

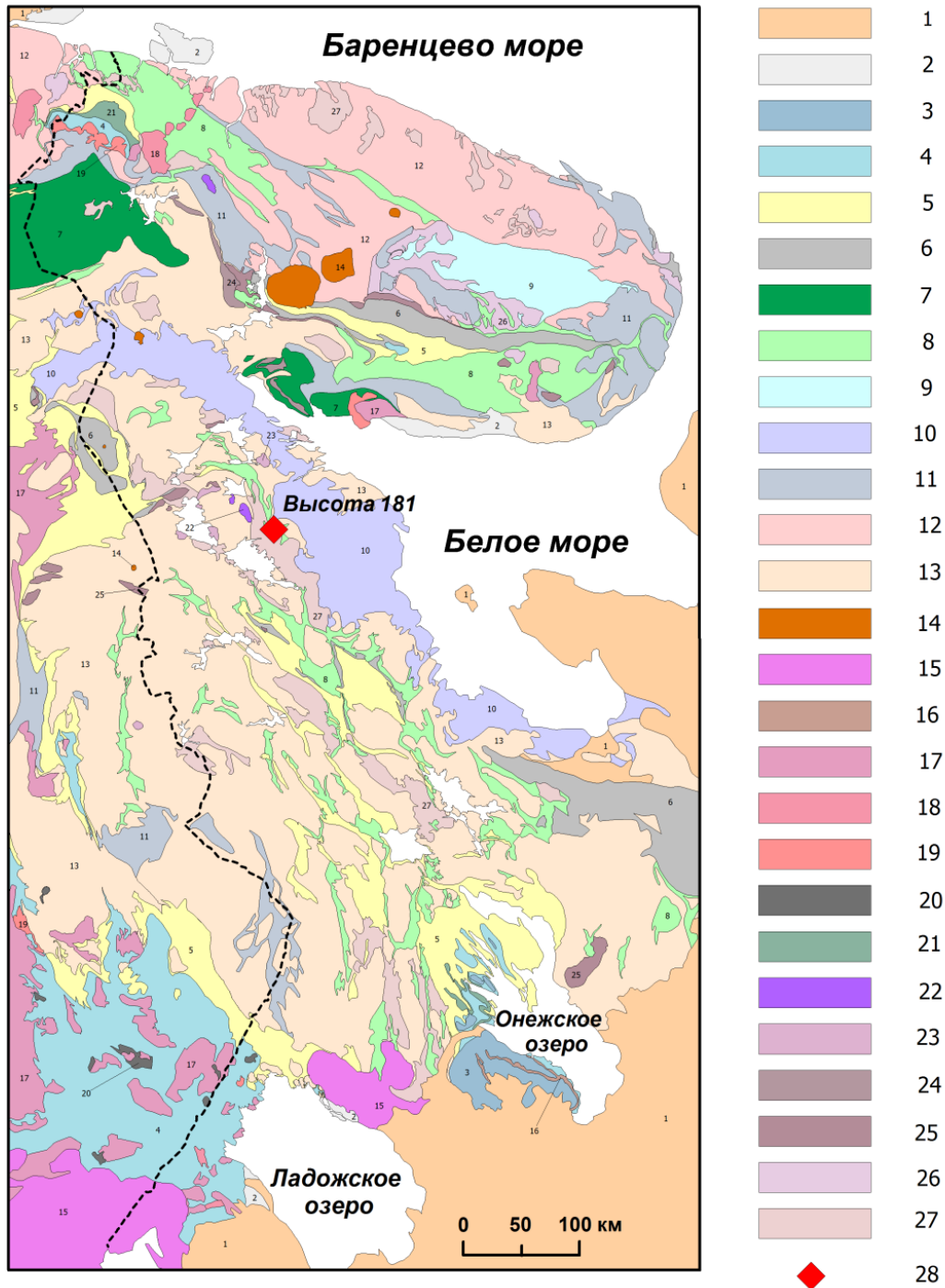


Рис. 1. Обзорная геологическая карта Карело-Кольского региона

(использованы: Геологическая карта Кольского региона [редактор Ф.П.Митрофанов, Апатиты, 2001; Geological Map of the Fennoscandian Shield (scale 1: 2 000 000: GSF, GSN, GSS and SC Mineral, 2008] Условные обозначения:

1 – объединенный венд (неопротерозой) и палеозой (фанерозой); мезопротерозой: 2 – рифей; палеопротерозой: палеопротерозой и архей: 3 – венсий; 4 – калевий; 5 – ятулий-людиковий; 6 – сумий и сариолий нерасчлененные; 7 – Лапландская гранулитовая провинция; 8 – фрагменты разновозрастных зеленокаменных поясов; 9 – Кейвская провинция; 10 – Беломорская провинция; 11 – нестратифицированный кольско-беломорский комплекс; 12 – ТТГ кольский комплекс (архейский фундамент); 13 – ТТГ карельский комплекс (архейский фундамент). Магматические комплексы: 14 – палеозойские щелочные интрузии (0.38 – 0.36 млрд лет); 15 – анортзит-рапакивигранитные комплексы (1.7 – 1.5 млрд лет); 16 – габбро-дolerиты (1.76 млрд лет); 17 – позднеорогенные граниты (1.84 – 1.81 млрд лет); 18 – граниты, гранодиориты, кварцевые монзониты и др. (1.86 – 1.84 млрд лет); 19 – граниты (1.95 – 1.91 млрд лет); 20 – перидотиты, пироксениты, габбро (1.97.-1.91 млрд лет); 21 – толеитовые базальты, перидотиты, габбро-верлиты (1.97 млрд лет); 22- щелочно-габбровые расслоенные интрузивы с карбонатами (2.0 – 1.98 млрд лет); 23 – чарнокиты, гранодиориты, монзониты (2.4 млрд лет); 24 – анортзиты, габбро (2.5 млрд лет); 25 – расслоенные интрузивы основных и ультраосновных пород (2.5 – 2.4 млрд лет); 26 – граниты, гранодиориты, щелочные граниты, щелочные сиениты (2.6. – 2.5 млрд лет); 27 – граниты (2.7 – 2.6 млрд лет); 28 – месторождение «Высота-181».

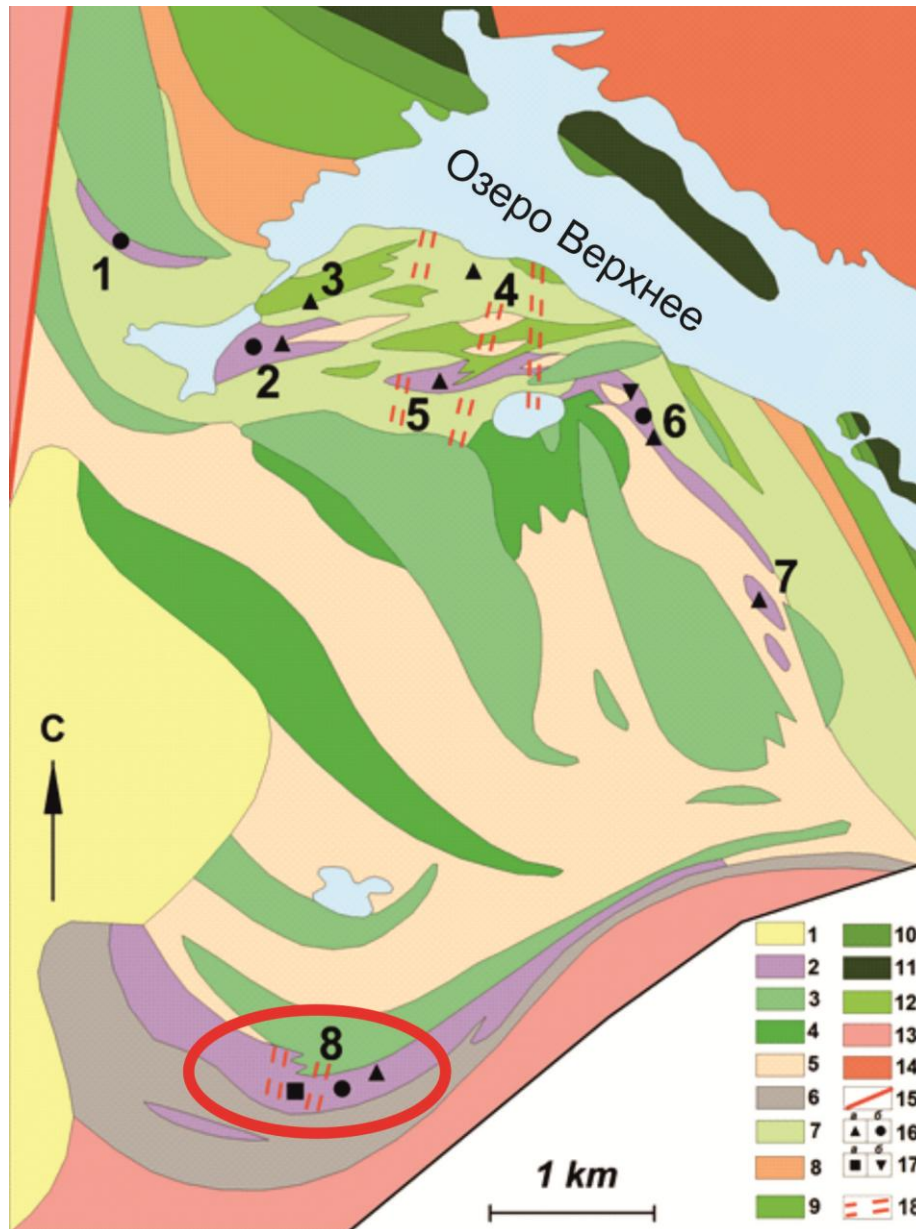


Рис. 2. Схема Хизоварского рудного поля с главными месторождениями [Shchiptsov, Nikiforov, 2016]. Условные обозначения: 1 – четвертичные отложения; 2 – метасоматиты стадии кислотного выщелачивания; 3 – базальтовые лавы подушечного типа, силлы ультрабазитов; 4 – фельзитовые туфы, лавобрекчии; 5 – метадациты и метариолиты; 6 – силлы габбро; 7 – осадочно-вулканогенные и терригенные метаосадки; 8 – метаандезиты, гипербазитовые бониниты и базальты; 9 – метажелезистые базальты; 10 – бонинитовые серии метавулканиитов; 11 – магнезиальные базальты с телами перидотитовых кумулатов. Интрузивные и субвулканические породы: 12 – тела субвулканиитов от мафитов до фельзитов; 13 – диориты и гранодиориты; 14 – микроклиновые граниты; 15 – тектонические дислокации; 16 – промышленные минералы а) кварц; б) кианит; 17 – промышленные минералы а) мусковит; б) гранат. Цифрами на рис. обозначены рудопроявления: 1 – кварциты (кварц), 2 – 3 – метаморфогенные кианитовые руды, 4 – метасоматические кианитовые руды с пиритом и графитовой минерализацией, 5 – метасоматические кианитовые руды с пиритом, 6 – метасоматические кварц-мусковитовые руды с кианитом, 7 – метасоматические кианитовые руды, 8 – метасоматические гранатовые руды с кианитом, ставролитом и кварцем. 18 – зоны дробления пород, контролирующие комплексное оруденение. Обведена область расположения месторождения «Высота-181».

Для ТГЗО и Хизоваарской структуры характерно наложение раннепротерозойского (свекофеннский этап) умеренно- и высокобарического метаморфизма амфиболитовой фации на продукты позднеархейского (лопийский этап) метаморфизма амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций неопределенных давлений [Государственная геологическая карта, 2012].

Лопийский этап метаморфизма связан с неорхейским тектоно-магматическим циклом, для которого характерно формирование зеленокаменных поясов (в том числе Тикшеозерского – структурной составляющей ТГЗО) и последующие метаморфические события. Данный этап характеризуется метаморфизмом фации альмандиновых амфиболитов повышенных давлений [Володичев, 1984, Ручьев, 2002, 2010]. В районе оз. Кереть возраст амфиболитового метаморфизма был определен Е. В. Бибиковой с соавторами [Бибикова, 1993] как 2741 \pm 14 млн. лет (U-Pb метод по циркону). Свекофеннский этап метаморфизма в пределах ТГЗО характеризуется амфиболитовой фацией. Разными исследователями в разные годы параметры этого этапа метаморфизма оценивались P~6-7 кбар и T~580-670° [Бушмин, 1978; Бибикова и др., 2003; Володичев и др., 2011; Сергеев, Лобач-Жученко, 1993, Фации метаморфизма, 1990, Ручьев, 2002, 2010], что соответствует кианит-биотит-ставролитовой субфации амфиболитовой фации [Bushmin, Glebovitsky, 2016]. На фоне свекофеннского этапа метаморфизма протекали процессы метасоматоза, результатом которых стали высокие концентрации промышленных минералов (граната, кианита, мусковита и ставролита).

К Южному флангу Хизоваарской структуры принадлежит месторождение гранатовых руд «Высота-181», представляющее собой главную, ярко выраженную в рельефе линзу рудосодержащих пород, обрамленную значительно более мелкими и перемежающимися с безрудными породами телами зональной и линзовидной формы. Главная линза вытянута в субширотном направлении (80°) на 1,2 км., при ширине до 350 м. Рельеф кровли коренных скальных пород в пределах месторождения «Высота-181» крайне неоднородный, холмистый, с единичными вертикальными стенками (превышения до 20 м.), обнаженность участка довольно хорошая в пределах гряд, но в болотистых местах и низменностях, а также на пологих склонах наблюдается сильная задернованность, затрудняющая геологическую съемку.

Как видно из схемы месторождения (рис.3), вся продуктивная толща представляет собой зоны контакта коллажированных метаморфизованных пород, с наложенными процессами метасоматоза. На практике бывает сложно определить первичный субстрат той или иной породы, особенно если речь идет о метасоматитах внутренних зон. Проявлены синрудные хрупко-пластичные и пострудные хрупкие деформации. Метаморфизованные породы представлены следующими разновидностями: амфиболиты, в том числе гранатовые, биотит-амфиболовые и амфиболовые гнейсы, гранат-биотитовые гнейсы. Для определения стратиграфического положения рудовмещающих пород было проведено сопоставление их химического состава с составами метаморфических пород хорошо изученных месторождений Северного фланга Хизоваарской структуры: «Хизоваара» и «Межозерное» по данным [Щипцов, 1983, Кожевников, 2000, Родионов, 2001], сформированных по протолиту осадочно-вулканогенных отложений СТА-2 [Кожевников, 2000].

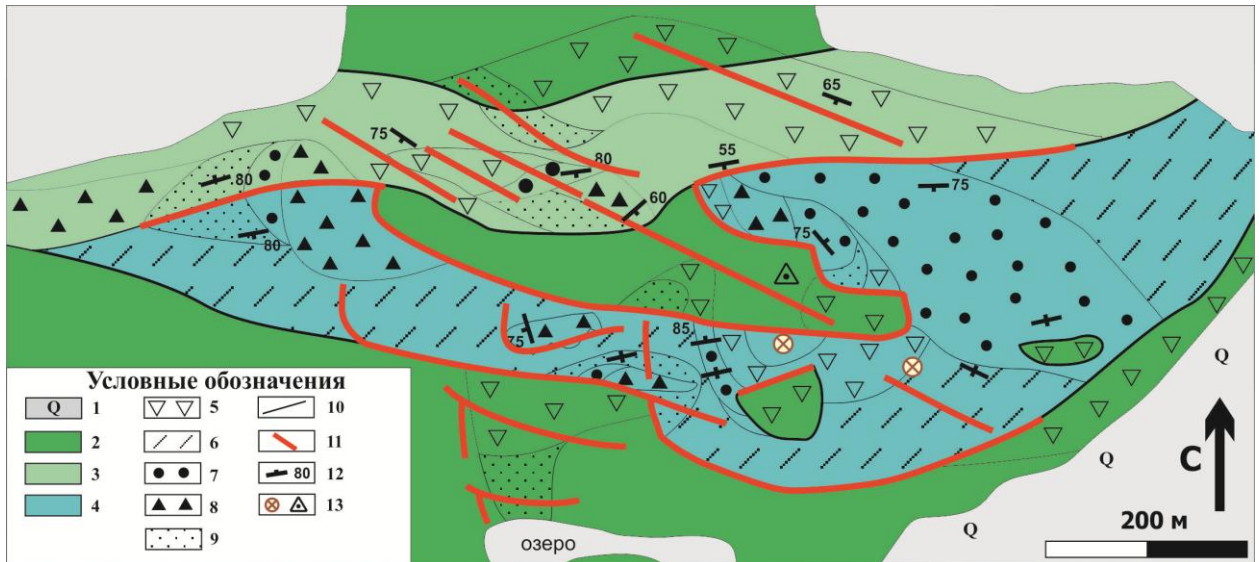


Рис. 3. геологическая схема месторождения «Высота-181».

1. – четвертичные отложения. 2. – гранатые и безгранатые амфиболиты. 3. – амфибол-биотитовые гнейсы. 4. – гранат-биотитовые гнейсы. 5. – внешние зоны метасоматоза по разным породам месторождения. 6. – комплементарные метасоматиты $St-Ms-Ky-Grt-Qtz$ состава. 7. – кислотные метасоматиты $Grt-Ky-Qtz$ состава (с Ms, Py). 8. – $Grt-Qtz$ метасоматиты. 9. – $Grt-Ms-Qtz$ метасоматиты. 10. – геологические границы. 11. – тектонические деформации. 12. – элементы залегания. 13. – опытные карьеры и триангуляционный пункт.

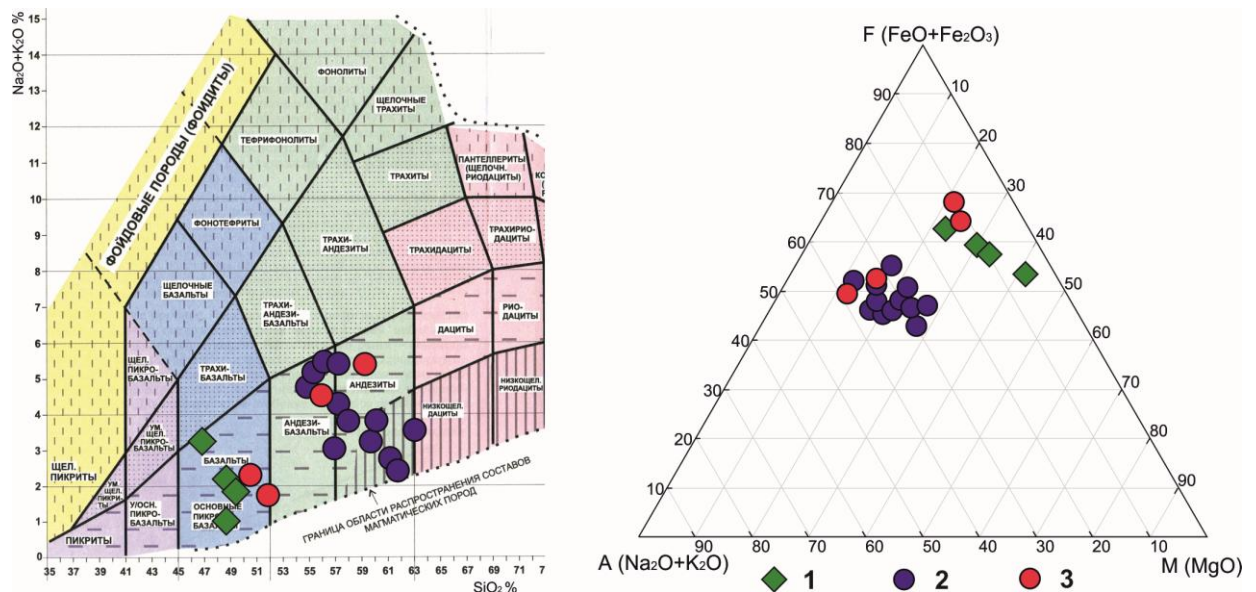


Рис. 4. Составы метаморфических пород Хизоваарского рудного поля на классификационных диаграммах TAS и AFM: 1 - базальты, амфиболиты месторождения «Хизоваара», 2 – андезиты, амфибол-биотитовые гнейсы месторождений «Хизоваара» и «Межозерное» [Щипцов, 1983, Кожевников, 2000, Родионов, 2001]. 3 – амфиболиты и гнейсы месторождения «Высота-181»

Результаты сравнения представлены на классификационных диаграммах рис. 4, состав пород в таблице 1. Состав амфиболитов и амфибол-гранат-биотитовых гнейсов коррелирует с аналогичными породами, принадлежащими к СТА-2. Наблюдаются также общие черты в строении и локализации руд месторождения «Высота-181» и месторождений Северного фланга. К сходствам относится коллажированная структура осадочно-вулканогенных пород СТА-2 с переслаиванием маломощных геологических тел базальтового и андезитового состава. Данная структура была отмечена для СТА-2 [Кожевников, 2000].

Таким образом, особенностью геологического строения участка, слагающего территорию месторождения «Высота-181» является прямая связь с породами осадочно-вулканогенной стратотектонической ассоциации Хизоваарской структуры ТГЗО. Данные породы испытали процессы метаморфизма и метасоматоза, приведшие к повышенным концентрациям граната, кианита, ставролита и мусковита.

Второе защищаемое положение:

Формирование и локализация комплексных гранатовых руд месторождения «Высота-181» определяется сочетанием литолого-стратиграфических, метаморфогенно-метасоматических и структурных факторов контроля.

Рудоконтролирующие факторы определяют закономерности условий формирования и локализации оруденения в пределах рудных районов и месторождений и классифицируются по характеру геологических процессов: разрывные, складчатые, вулканические, магматические, стратиграфические и/или литологические, метаморфические и другие [Шаталов и другие, 1963].

Для выявления роли рудоконтролирующих факторов были составлены карты распределения промышленных минералов. Построение карт проводилось с помощью интерполятора для создания регулярных тематических слоев - методом взвешенных обратных дальностей (Inverse Distance Weighting – IDW), входящего в программный пакет MapInfo©. Результаты были обработаны графическим процессором (рис 5-8). На карты распределения нанесены три типа субстрата и главные деформации. На основании этих построений были определены три типа факторов контроля руд: литологические (литолого-стратиграфические), структурные и метаморфогенно-метасоматические. Литологические (литолого-стратиграфические) включают состав пород субстрата, особенности их формирования, химический состав, благоприятный для формирования в процессе метаморфизма руд граната, кианита, ставролита, мусковита и кварца. Структурные факторы включают элементы складчато-разрывных нарушений, локализирующих оруденение и создающих благоприятные условия для движения метасоматических растворов. Метаморфогенно-метасоматические факторы содержат в себе региональный метаморфизм и связанные с ним процессы метасоматоза, критически важные для формирования руд месторождения.

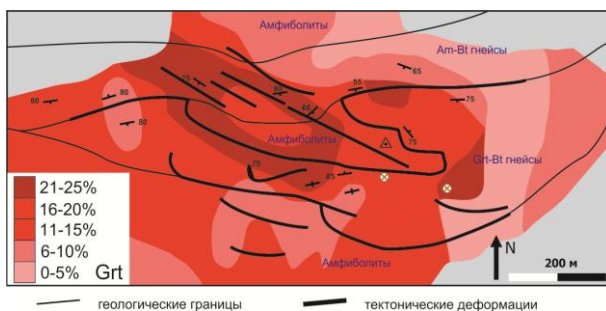


Рис. 5. Распределение гранатового оруденения.

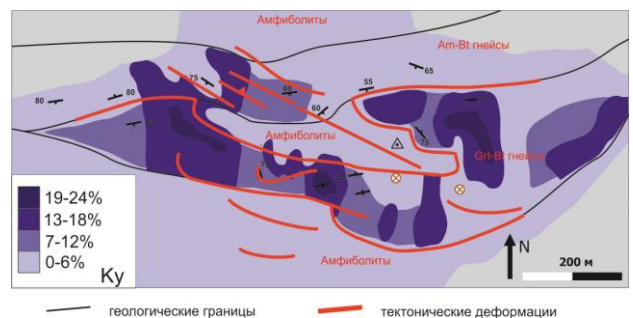


Рис. 6. Распределение кианитового оруденения.



Рис. 7. Распределение ставролитового оруденения.

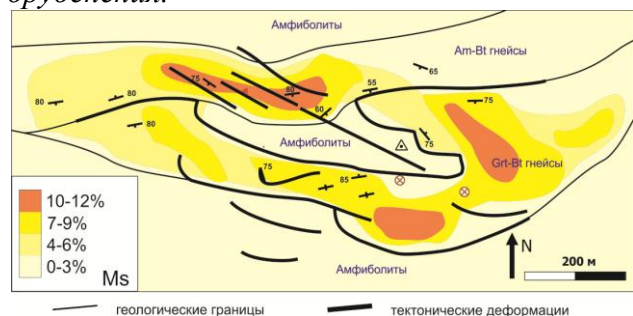


Рис. 8. Распределение мусковитового оруденения.

Литологические (литолого-стратиграфические) факторы.

Пространственная связь рудных тел месторождения с метаморфическими породами, сформированными по протолиту вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород является геологическим признаком, относящимся к литолого-стратиграфическим факторам контроля руд. Их можно охарактеризовать как рудораспределяющие, так как размещение руд граната, кианита, ставролита, мусковита и кварца связано с петрохимической специализацией пород протолита и их природной проницаемостью для гидротермально-метасоматических растворов.

1. Пространственная связь с толщами амфибол-биотитовых гнейсов.

Амфибол-биотитовыми гнейсами в работе определяется ряд пород с преимущественным содержанием Am, Bt и Pl ($n > 70$), лепидогранобластовой структурой и гнейсовидной текстурой. Пространственная связь с амфибол-биотитовыми гнейсами является рудоконтролирующим для комплексных метасоматических руд граната, кианита, мусковита.

2. Пространственная связь с толщами гранатовых амфиболитов.

В пределах месторождения выделяются гранатсодержащие амфиболиты, особенно с высокими содержаниями граната на контактах амфиболитов с другими породами и в зонах тектонических деформаций. Метасоматиты, имеющие в качестве исходного субстрата амфиболиты, встречаются редко и невелики по занимаемой площади. Пространственная связь с амфиболитами является рудоконтролирующим фактором для граната метаморфической генерации и промышленных минералов из незначительных по площади амфиболсодержащих метасоматитов.

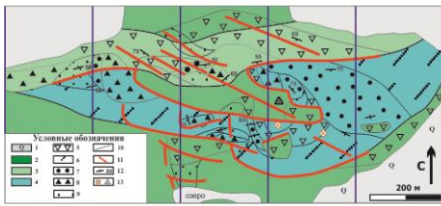
3. Пространственная связь с толщами гранат-биотитовых гнейсов.

Гранат-биотитовые гнейсы являются основной рудовмещающей и интенсивно метасоматически измененной породой. Они залегают в центральной части месторождения, ярко выражены в рельефе и хорошо обнажены. Имеют хорошо прослеживаемые контакты с амфибол-биотитовыми гнейсами и амфиболитами. В породах повсеместно проявлены признаки пластичных и наложенных хрупких деформаций. По Grt-Bt гнейсам сформировано наиболее значимое оруденение Grt-St-Ky и Grt-Ms метасоматитов. Пространственная связь с гранат-биотитовыми гнейсами является рудоконтролирующим фактором для граната метаморфической и метасоматической генерации, ставролита, кианита и мусковита, а также кварца из анхимономинеральных вторичных кварцитов и гидротермальных жил. Толща гранат-биотитовых гнейсов является оптимальной зоной для метасоматической минерализации в силу высокой проницаемости, обусловленной литологическим строением и тектоническими процессами.

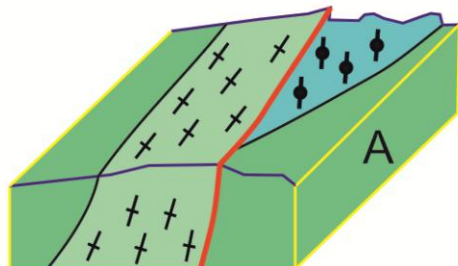
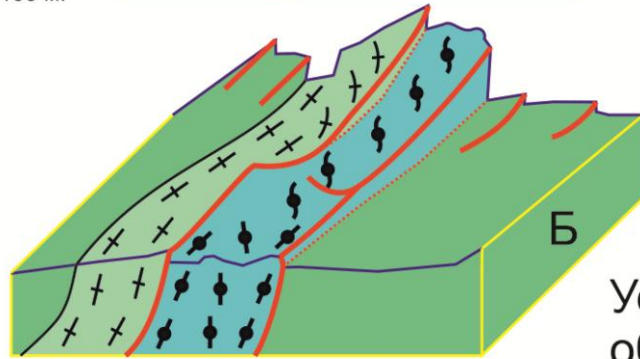
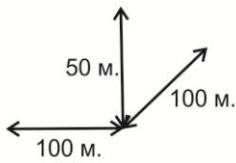
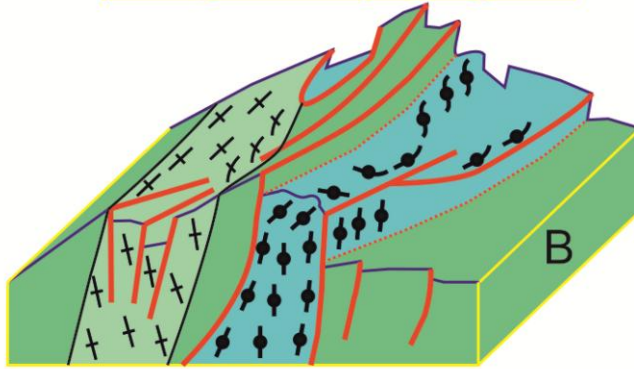
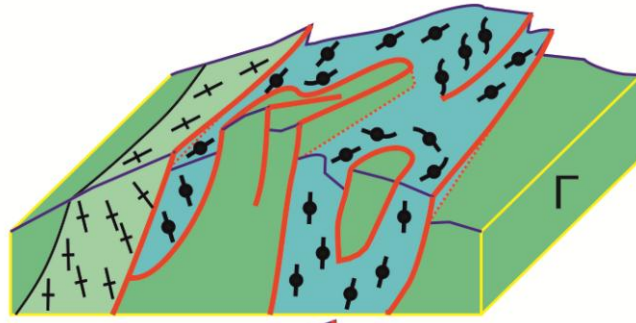
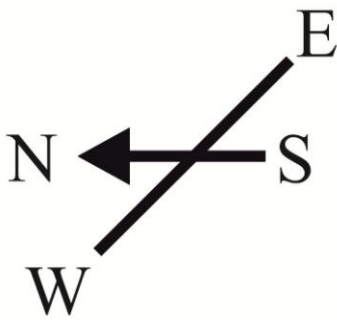
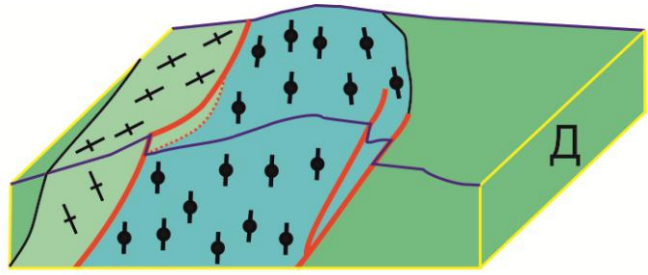
Структурные факторы

Хизоваарская структура и месторождение «Высота-181» по геологическим условиям расположено в пределах иерархической зоны сдвига (shear zone), приуроченной к области сочленения Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса [Колодяжный, 2004]. Структуры разной иерархии различаются при анализе в пределах Хизоваарской структуры [Азимов, 2012]. Геологическая съемка и анализ кинематических индикаторов в пределах месторождения «Высота-181» показали развитие субвертикальных разрывных нарушений на фоне затухающих сдвиговых деформаций, развитых по азимуту 80-100°, в плане сдвиг характеризуется как правый. Блок-диаграмма месторождения представлена на рис. 9. К структурным рудоконтролирующим факторам на месторождении относится деформационный режим локализации руд. Применительно к месторождению целесообразно рассматривать в качестве структурных рудоконтролирующих факторов синрудный и пострудный деформационные режимы. Синрудными являются те структурные факторы, которые непосредственно определяют движение метасоматических растворов и дальнейшую локализацию рудных тел. Пострудные структурные факторы, связанные с хрупкими деформациями, относятся к рудолокализующим, отвечая за границы рудной минерализации и мощность рудных тел.

Блок-диаграмма



А Б В Г Д



Условные обозначения


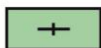



-  1
-  2
-  3
-  4
-  5

Рис. 9. Блок-диаграмма месторождения «Высота-181». Условные обозначения: 1. Гранатовые амфиболиты; 2. Амфибол-биотитовые гнейсы; 3. Гранат-биотитовые гнейсы; 4. а) разрывные нарушения; б) нижние края сместителей на дневной поверхности; 5. а) профили рельефа; б) построения.

1. **Синрудный деформационный режим.** Рассланцевание пород на фоне деформационных обстановок создает зоны, хорошо проницаемые для растворов, контролируя таким образом метасоматическую зональность (рудораспределяющий фактор). В силу этого, данный процесс является значимым для формирования всех природных разновидностей руд в метасоматитах. Зоны рассланцевания также определяют формы и размеры рудных тел.

2. **Пострудный деформационный режим.** Не участвуя в формировании оруденелых пород, хрупкие деформации отвечают за локализацию рудных тел. Чаще всего проявлены горсто-грабенные структуры, с превышениями до 10 м. Кроме того, плоскопараллельные системы трещин часто вмещают гидротермальные кварцевые жилы (рис. 4.3.6). Трещины и сместители пострудных деформаций пересекают сланцеватость и линейность пород, ориентировки минералов, формирование которых подчиняется стрессовым режимам метаморфизма Свекофеннского этапа.

Метаморфогенно-метасоматические факторы

Метаморфогенно-метасоматические факторы контроля руд связаны с региональным метаморфизмом Свекофеннского этапа и синхронными процессами метасоматоза.

1. С **региональным метаморфизмом** связано формирование граната из гранат-биотитовых гнейсов и гранатовых амфиболитов. Параметры метаморфизма оцениваются как $P \sim 6-7$ кБар и $T \sim 580-670^\circ$ [Бушмин, 1978; Фации метаморфизма, 1990; Володичев и др., 2011]. Данные параметры соответствуют ставролит-кианит-биотит-мусковитовой и биотит-кианит-гранат-мусковитовой субфациям амфиболитовой фации [Bushmin, Glebovitsky, 2016]. Фактор метаморфизма наиболее обширен и характерен для всех пород месторождения. По данному признаку месторождение относится к классу метаморфогенных. На фоне метаморфизма проявлены деформации и процессы метасоматоза, поэтому можно отнести данный рудоконтролирующий фактор к формирующим оруденение не только в пределах месторождения, но и в пределах Хизоваарской структуры в целом. С метаморфизмом связано формирование граната в амфиболитах и гнейсах (в среднем 7%).

2. **Кислотный метасоматоз кианит-кварцевой фации** проявлен в гнейсах и является главным механизмом, приводящим к K_u оруденению пород месторождения. Наиболее очевидным признаком метасоматического процесса кианит-кварцевой фации является метасоматическая зональность, при которой минералы метаморфических пород (Am, Bt, Pl) полностью замещаются в промежуточных и внутренних зонах кианитом и кварцем. Для метасоматитов характерна зональная, линзовидная и жильная морфология, наличие реликтов пород субстрата, порфиробласты граната неправильной формы и кианита, гранолепидобластовые структуры пород, зональность минералов и анхимономинеральные породы, приуроченные к внутренним метасоматическим зонам. Кислотный метасоматоз кианит-кварцевой фации является рудоконтролирующим процессом для комплексных кианитовых и гранатовых руд.

3. **Кислотный метасоматоз мусковит-кварцевой фации** проявлен в породах, хорошо проницаемых для растворов (гнейсах и развитых по ним метасоматитах). Основное влияние данный процесс оказывает на формирование Grt-Ms-Qtz, Ms-Qtz метасоматитов и отдельных обособлений Grt-Ms состава в различных типах биотитсодержащих пород. Часто наблюдается ситуация, при которой отдельные бласты граната в Grt-Bt-Qtz метасоматитах (внешних зонах метасоматоза по субстрату Grt-Bt гнейсов) окаймлены мусковитом.

4. Продукты **основного метасоматоза ставролит-гранатовой фации** распространены во всех породах месторождения и представлены ставролитом и гранатом. Ставролит наблюдается в виде пойкилитовых кристаллов, отдельных порфиробластов, сосредоточенных в линзах и зонах. Гранат представлен хорошо ограненными кристаллами диаметром до 3 см. с низким содержанием включений и насыщенным темно-красным оттенком.

5. **Fe-Mg метасоматоз, сопряженный с кислотным выщелачиванием (процесс перетолжения)** хорошо описан для метасоматитов Хизоваарской структуры в нескольких

работах [Бушмин, 1978; Проскурин, 2014]. В аспекте рассматриваемой проблемы процесс переотложения интересен формированием анхимономинеральных гранатитов в виде жильных и линзовидных тел, часто приуроченных к контактам между породами протолита. Для месторождения «Высота-181» данный процесс сопряжен с дебазификацией пород в процессе кислотного выщелачивания.

На основании изучения минерального состава метасоматитов можно построить идеализированные метасоматические колонки для процессов кислотного метасоматоза кианит-кварцевой фации и основного метасоматоза ставролит-гранатовой фации. При геологической съемке встречаются только отдельные зоны этих колонок, в реальной ситуации минеральный состав пород более сложен. Редко встречаются продукты внутренних зон – мономинеральные кварцевые метасоматиты и гранатиты.

Кислотный метасоматоз (по гнейсам)

$\Phi=K_i$	Инертные компоненты
0. Qtz+Ky+St+Grt+Pl+Bt	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , FeO, MgO, CaO, K ₂ O
1. Qtz+Ky+St+Grt+Pl	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , FeO, MgO, CaO
2. Qtz+Ky+St+Grt	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , FeO, MgO
3. Qtz+Ky+St	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , FeO
4. Qtz+Ky	SiO ₂ , Al ₂ O ₃
5. Qtz	SiO ₂

Кислотный метасоматоз (по амфиболитам)

$\Phi=K_i$	Инертные компоненты
0. Qtz+Ky+Grt+Pl+Am	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, CaO, Na ₂ O
1. Qtz+Ky+Grt+Pl	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, CaO
2. Qtz+Ky+Grt	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO
3. Qtz+Ky	SiO ₂ , Al ₂ O ₃
4. Qtz	SiO ₂

Основной метасоматоз по гнейсам и амфиболитам (на основании метасоматических колонок, характеризующих зональность ставролит-гранатовой фации магнезиального метасоматоза, отраженных в работе С. А. Бушмина [Бушмин, 1978]).

Основной метасоматоз (по амфиболитам)

$\Phi=K_i$	Инертные компоненты
1. Qtz+St+Grt+Pl+Am	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , FeO, CaO, Na ₂ O
2. Qtz+St+Grt+Pl	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , FeO, CaO
3. Qtz+St+Grt	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , FeO
4. Qtz+Grt	SiO ₂ , Al ₂ O ₃
5. Grt	Al ₂ O ₃

Основной метасоматоз (по гнейсам)

$\Phi=K_i$	Инертные компоненты
1. Qtz+Grt+St+Pl+Bt	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , FeO, CaO, K ₂ O
2. Qtz+Grt+St+Pl	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , FeO, CaO
3. Qtz+Grt+St	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , FeO
4. Qtz+Grt	SiO ₂ , Al ₂ O ₃
5. Grt	Al ₂ O ₃

Продукты мусковит-кварцевой фации кислотного выщелачивания накладываются на все типы пород, интенсивность метасоматоза определяются зонами деформаций. Главным следствием метасоматоза мусковит-кварцевой фации является замещение биотита

мусковитом, в том числе в слабоизмененных породах субстрата (гранат-биотитовых гнейсах). Данный процесс описывался для гнейсов северного фланга Хизоваарской структуры [Бушмин, Глебовицкий, 1983]. В зонах милонизации содержание мусковита может достигать 80% по данным минералогического анализа. Обычная ассоциация продуктов мусковит-кварцевой фации кислотного выщелачивания включает кварц, мусковит и гранат.

Изучение петрохимии метасоматитов проводилось путем сравнения составов на диаграммах ACF ($Al_2O_3+Fe_2O_3-CaO-FeO+MgO+MnO$) и AKF ($Al_2O_3+Fe_2O_3-K_2O+Na_2O-FeO+MgO+MnO$), отражающих соотношения малоподвижных ионов Al^{3+} и Fe^{3+} , железо-магнезиальной компоненты и щелочей (CaO в случае диаграммы ACF). Результаты (рис. 10) показывают, что в процессе кислотного метасоматоза резко падает содержание K_2O , Na_2O и двухвалентных ионов. Гранатовые метасоматиты в полном соответствии с теорией обладают повышенным содержанием FeO и MgO по сравнению с иными разновидностями пород, являясь продуктом железо-магнезиального переотложения. Al_2O_3 и Fe_2O_3 стабильны в кианитсодержащих промежуточных метасоматических зонах.

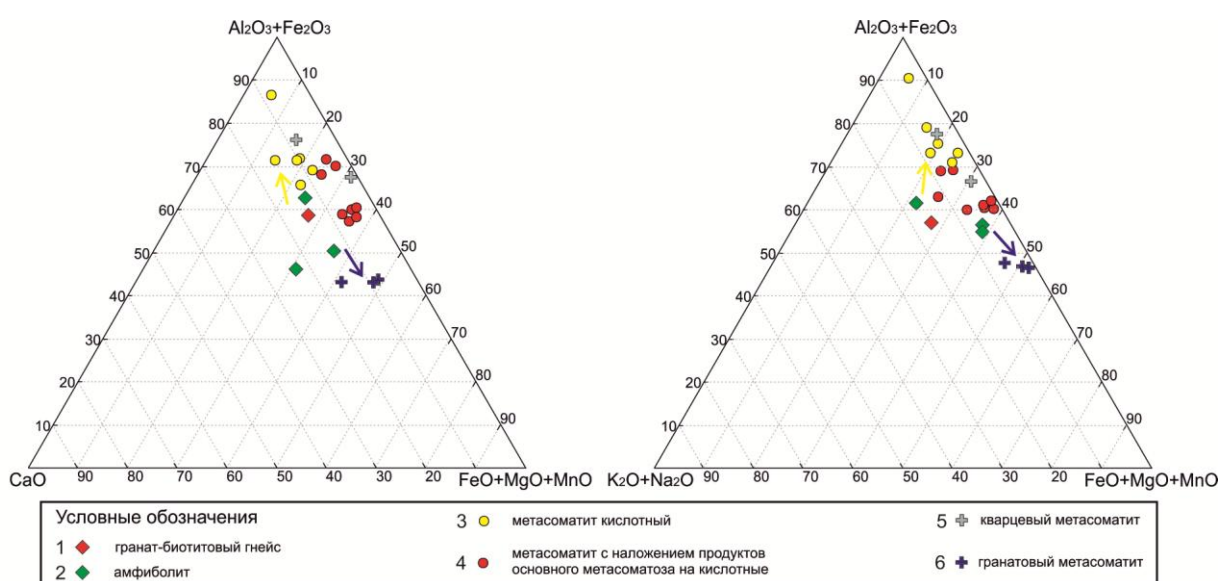


Рис. 10. Диаграммы ACF ($Al_2O_3+Fe_2O_3-CaO-FeO+MgO+MnO$) и AKF ($Al_2O_3+Fe_2O_3-K_2O+Na_2O-FeO+MgO+MnO$) для химических составов пород месторождения.

Таблица 1. Применимость факторов контроля для описания и геометризации типов руд.

Факторы контроля руд.	Тип оруденения				Масштаб и тип оруденения
	Grt	St	Ky	Ms	
Литолого-стратиграфические факторы					
Пространственная связь с толщами Am гнейсов.	+	+	+	+	В соответствии с картой
Пространственная связь с толщами Grt амфиболитов.	++	-	-	-	В соответствии с картой
Пространственная связь с толщами Grt-Vt гнейсов.	++	+	+	++	В соответствии с картой
Структурные факторы					
Синрудные деформационные режимы	++	++	++	++	Метасоматические зоны, шириной до 40 м.
Пострудные деформационные режимы	+	+	+	+	Блоки пород, локализованные в структурных парагенезах.

Метаморфогенно-метасоматические факторы					
Свекофенский метаморфизм амфиболитовой фации с параметрами T~650 P~5-6 кБар. (прослеживается для оруденения в породах субстрата).	++	-	-	-	В соответствии с картой (метаморфические комплексы)
Кислотный метасоматоз кианит-кварцевой фации.	+	-	++	+	Метасоматические зоны шириной до 20 м.
Кислотный метасоматоз мусковит-кварцевой фации.	-	-	+	++	Метасоматические зоны шириной до 5 м., сопряженные с зонами расланцевания
Основной метасоматоз ставролит-гранатовой фации.	++	++	-	-	Линейная и зональная вкрапленность, линейные зоны шириной до 2 м.
Fe-Mg метасоматоз, сопряженный с кислотным выщелачиванием	++	-	-	-	Отдельные тела жильной формы шириной до 1 м.

- нехарактерно, + характерно, ++ наиболее характерно

Анализ данных, сведенных в таблицу 1. демонстрирует следующие закономерности: 1. ставролит формируется в результате основного метасоматоза в пределах хорошо проницаемых для растворов пород, чаще всего продуктах метасоматоза кислотных фаций, не зафиксировано формирование ставролит-гранатовых метасоматитов непосредственно в породах субстрата. 2. кианит формируется как продукт кислотного выщелачивания кианит-кварцевой фации по субстрату гнейсов. 3. мусковитовые руды формируются в результате кислотного метасоматоза мусковит-кварцевой фации в зонах интенсивных хрупко-пластичных деформаций. 4. гранат характерен для метаморфических пород: гранатовых амфиболитов и гранат-биотитовых гнейсов и метасоматитов по всем типам субстрата и является главным промышленным минералом, отмеченным во всех породах месторождения. Также формирование граната происходит на участках Fe-Mg метасоматоза (процесс переотложения). Чаще всего промышленные минералы формируются в ассоциациях, что позволяет говорить о существовании комплексных руд.

В результате исследований установлено, что формирование метасоматитов кислотного выщелачивания кианит-кварцевой фации и основных метасоматитов ставролит-гранатовой фации по гранат-биотитовым гнейсам стало причиной высоких содержаний граната, кианита, ставролита и мусковита, определяемых как комплексные руды, факторы контроля которых связаны с литолого-стратиграфическими, метаморфогенно-метасоматическими и структурными особенностями вмещающей среды.

Третье защищаемое положение:

На месторождении «Высота-181» выявлены три природных типа гранатовых руд, отличающихся по составу, кристалломорфологии граната, пространственному положению пород и характеристикам попутных полезных компонентов и три природных типа комплексных руд.

Гранаты из руд месторождения «Высота-181» характеризуются неоднородностью форм, состава и зональности. Для оценки месторождения важно выделить природные типы гранатовых руд, распространение которых чаще всего коррелирует с конкретными метаморфическими и метасоматическими комплексами. Для самих же кристаллов важными являются характеристики чистоты (содержание и состав включений) и однородности (химическая зональность). Результаты расчета миналов (средние значения) отражены на рис. 11 на треугольной диаграмме в координатах альмандин-пироп-гроссуляр (Alm-Prp-Grs). Все гранаты могут быть отнесены к альмандинам, но разновидности из метасоматических пород более железистые, что связано с инертностью FeO при подвижности CaO и MgO при

кислотном выщелачивании. В данной группе также наблюдаются различия – более магнезиальные разновидности (>10% Prp) и менее магнезиальные (<10% Prp).

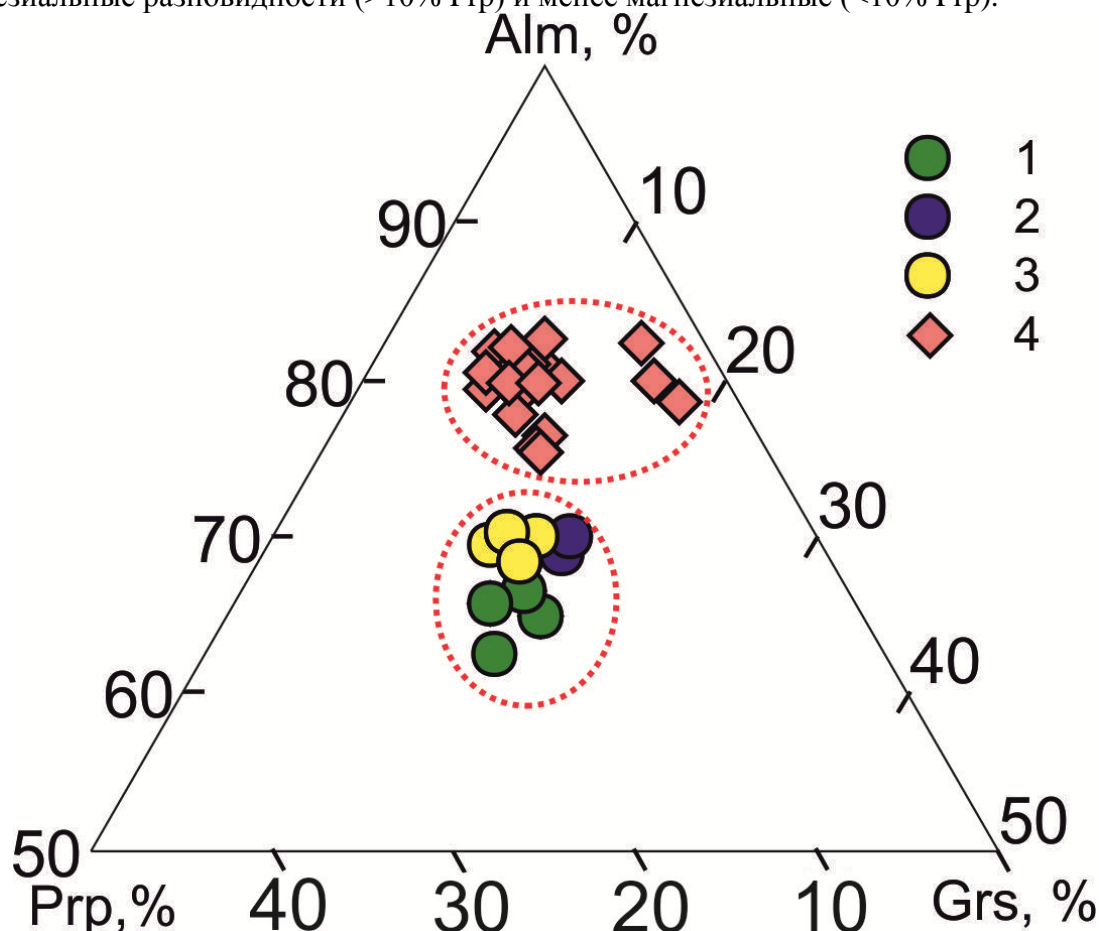


Рис. 11. Диаграмма альмандин-пироп-гроссуляр (Alm-Prp-Grs) для составов граната из пород месторождения.

Условные обозначения: 1. Гранат из амфиболитов. 2. Гранат из Am-Vt гнейсов. 3. Гранат из Grt-Vt гнейсов. 4. Гранат из метасоматитов.

Первый характерный тип гранатовых руд (**Grt-I**) проявлен в метаморфических комплексах (амфиболитах и Grt-Vt гнейсах (7% в среднем), в малых количествах (до 3%) в Am-Vt гнейсах. В основном представлен идиоморфными пойкилитами с содержанием включений до 15%. Размер зерен в пределах 2-4 см. Морфология кристаллов характеризуется идиоморфизмом, отсутствием реакционных кайм и равномерным распределением включений хлорита, кальцита и, в основном, кварца. Химическая зональность кристаллов отличается повышением содержания MgO и уменьшением MnO и CaO от центра к кайме кристалла (рис. 12-13). Данный тренд характеризует прямую зональность граната. Формирование прямой зональности связано либо с фракционированием компонентов между гранатом и породой, либо с изменением коэффициента распределения компонентов при повышении температуры и давления [Азимов, 2000]. Во втором случае прямая зональность характерна для гранатов метаморфических пород, сформировавшихся в условиях прогрессивного этапа метаморфизма [Перчук, Геря, 2004]. Прогрессивная зональность подобного рода (в том числе фиксируемая по изменению термобарометрических параметров) отмечалось и конкретно для малокальциевого альмандин-пироба из гнейсов [Медведева, 2007].

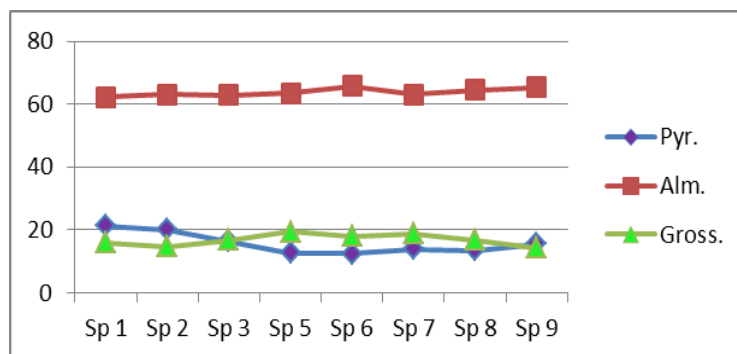


Рис. 12. Тренд изменения содержания минералов в кристалле *Grt I* мина (sp1 – кайма кристалла, sp9 – центр)

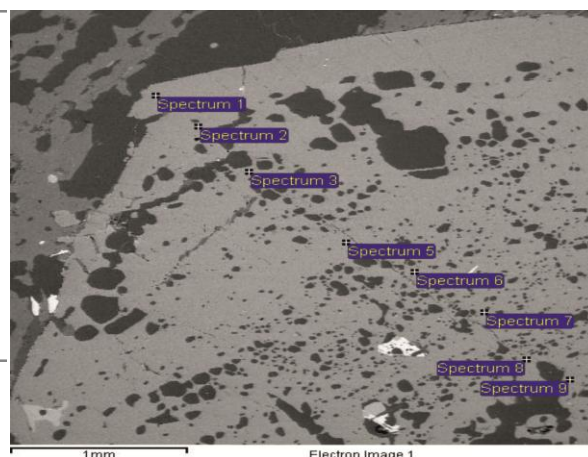


Рис. 13. Профиль изучения химической зональности

При это есть небольшие различия в составах гранатов из гнейсов и амфиболитов, но общий тренд химической зональности одинаков. Содержание альмандина – 60-65%, содержание пироба – 15-20%. Оруденение чаще всего проявлено в виде порфириобластов, равномерно распределенных по всей породе или метасоматической зоне. Содержание минерала стабильно для метаморфических пород (7% для гранатовых амфиболитов, не подверженных метасоматическим процессам, 7-8% для гранат-биотитовых гнейсов).

Второй тип гранатовых руд (**Grt-II**) проявлен в метасоматических зонах по разным типам субстрата. В наибольшей степени данный тип характерен для метасоматизированных амфибол-биотитовых и гранат-биотитовых гнейсов. Форма выделения – в виде отдельных крупных пойкилокристаллов, часто с гелицитовыми или ситовидными структурами. Кристаллы изометричной или неправильной формы с четкой ориентировкой включений кварцевого, биотитового, иногда кианитового состава. Ориентировка характеризует синдеформационный режим кристаллизации. Размер граната – до 15 см. Содержание включений превышает 20%. Для граната данного типа характерна розовая окраска и самое высокое содержание альмандина – более 70%, содержание пироба при этом наименьшее – 10-12%.

Кристаллы граната в породе линейно маркируют деформационные структуры метасоматитов. Наблюдаются вариации состава и распределения гранатовых зерен на участках гнейсовидности в промежуточных зонах метасоматоза, когда меланократовые *Grt-Vt-Pl-Qtz* полосы чередуются с лейкократовыми *Ky-Pl-Qtz*. Также характерна ситуация, при которой зерна граната проявляют признаки катаклаза – трещиноватость и раздробленность. Химический состав отличается однородностью (рис. 14-15).

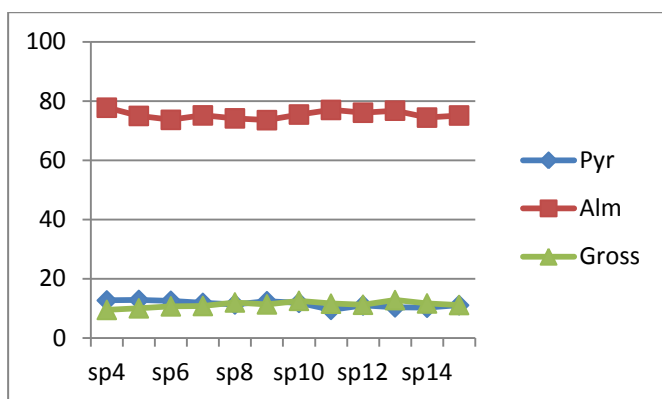


Рис. 14. Тренд изменения содержания миналов в кристалле Grt II типа (sp4 – кайма кристалла, sp15 - центр)

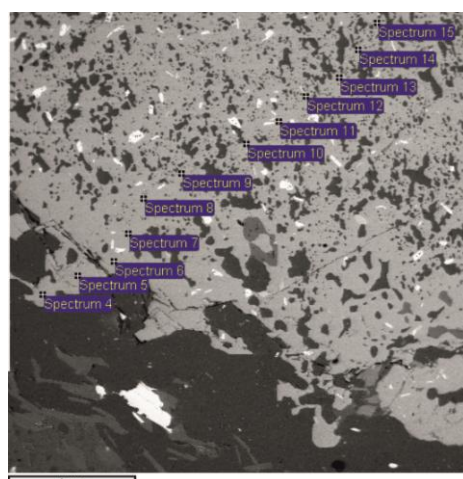


Рис. 15. Профиль изучения химической зональности

Третий тип гранатовых руд (**Grt-III**) формируется в виде идиоморфных, мелкозернистых (до 1,5 см) кристаллов. Может встречаться как в полиминеральных, содержащих в том числе Grt II, так и в кварцевых метасоматитах. В кварцевых метасоматитах (являющихся внутренними зонами кислотного метасоматоза) поздние метасоматические процессы ставролит-гранатовой фации проявлены более интенсивно, чем в метаморфических породах, в силу высокой пористости пород, подвергшихся перекристаллизации и высокой хрупкости таких пород при переходе гнейс (или амфиболит)→кварцевый метасоматит [Азимов, 2012]. Характерной особенностью данного типа граната является низкое содержание включений кварцевого состава (до 5%). Зерна граната темно-красного цвета, контрастно отличаются от Grt II, в том числе размерами и формой. Характерны корродированные реакционные каймы, разноориентированные включения. Химический состав отличается однородностью и наиболее высоким содержанием пироба (18-22%) по сравнению с гранатами других типов. Содержание алмандинна от 60 до 65%. Тренд изменения химической зональности схож с Grt I (прямая зональность) и характеризуется повышением содержания MgO от центра кристалла к кайме при снижении содержания CaO и MnO (рис. 16-17).

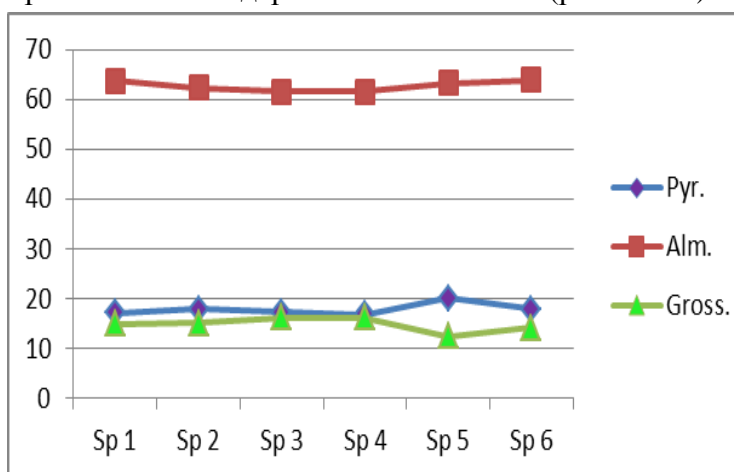


Рис. 16. Тренд изменения содержания миналов в кристалле Grt III типа (sp1 – кайма кристалла, sp3-4 - центр)

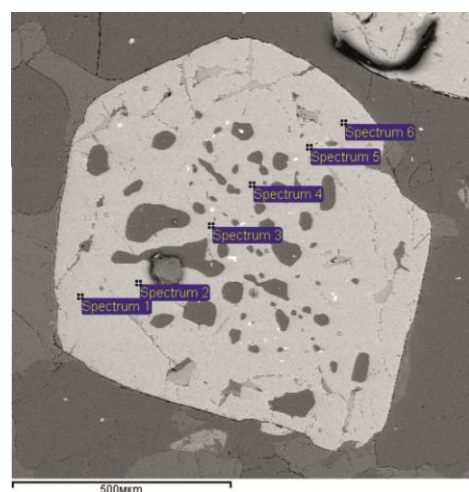


Рис. 17. профиль изучения химической зональности

В рамках месторождения данный тип граната может быть востребован в декоративном плане в силу хорошей естественной огранки, чистоты и легкой извлекаемости из мусковит-кварцевых пород.

Как уже отмечалось выше, гранаты разных типов могут встречаться одновременно, что является следствием полихронности процессов метасоматоза. Чаще всего отмечается совместное оруденение Grt-II+Grt-III в промежуточных зонах метасоматоза. Зональность граната может отличаться от рассмотренных примеров в силу разных термобарических и химических условий кристаллизации, но типы граната четко разделяются по ряду признаков. Все признаки сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Характеристика типов граната

Признак	Grt-I	Grt-II	Grt-III
Кристаллохимическая формула (усредненная)	$\{Fe^{2+}_{1,896}Mn_{0,123}Ca_{0,593}Mg_{0,377}\}_{3,0}[Al_{1,976}Fe^{3+}_{0,035}]_{2,0}(Si_{2,989}Al_{0,011})_{3,0}O_{12}$	$\{Fe^{2+}_{2,107}Mn_{0,051}Ca_{0,503}Mg_{0,324}\}_{3,0}[Al_{1,981}Fe^{3+}_{0,034}]_{2,0}(Si_{2,985}Al_{0,015})_{3,0}O_{12}$	$\{Fe^{2+}_{1,772}Mn_{0,081}Ca_{0,528}Mg_{0,494}\}_{2,9}[Al_{1,856}Fe^{3+}_{0,268}]_{2,1}(Si_{2,876}Al_{0,124})_{3,0}O_{12}$
Доля миналов (усредненное)	Альмандин – 62-76% Пироп – 10-21% Спессартин – 1-2,6% Андрадит – 0,3-1,0% Гроссуляр – 12-19%	Альмандин – 73-82% Пироп – 2-11% Спессартин – 0-2,3% Андрадит – 0-1,5% Гроссуляр – 8-13%	Альмандин – 60-67% Пироп – 13-22% Спессартин – 1,5-3,1% Андрадит – 1,0-3,0% Гроссуляр – 12-18%
Размеры, см.	1,5-4,0	2,2-15,0	0,3-1,5
Минеральная ассоциация	Am, Pl, Bt, Qtz	Ms, Ky, St, Qtz	Ms, St, Qtz
Содержание включений и их состав	До 15%, Chl, Clc, Qtz	До 30%, Qtz, Ms, Ky	До 5%, Qtz
Преимущественные условия формирования	Метаморфизм условий амфиболитовой фации	Метасоматоз Ky-Qtz фации в условиях деформаций	Метасоматоз St-Grt фации

Для выделения природных руд в пределах месторождения «Высота-181» выбран литолого-петрографический подход к геологическому картированию с проверкой результата валовым минералогическим анализом МТП. Данный подход особенно удобен для выделения природных типов руд, так промышленные минералы являются одновременно породообразующими.

Как было зафиксировано в предыдущей главе, для месторождения характерны три природных типа руд граната (**Grt-I, Grt-II, Grt-III**). Разные типы граната могут встречаться совместно, также оруденелые породы могут вмещать кианит, ставролит и мусковит в качестве попутных промышленных минералов. Изучение природных типов руд для выявления их минералого-технологических особенностей было проведено при помощи отбора и анализа малых технологических проб (МТП) по профилям, состоящих из нескольких точечных. Использование карт площадного распределения промышленных минералов (рис. 5-8) показывают, что существуют зоны наложения участков с высокими содержаниями промышленных минералов (рис 18).

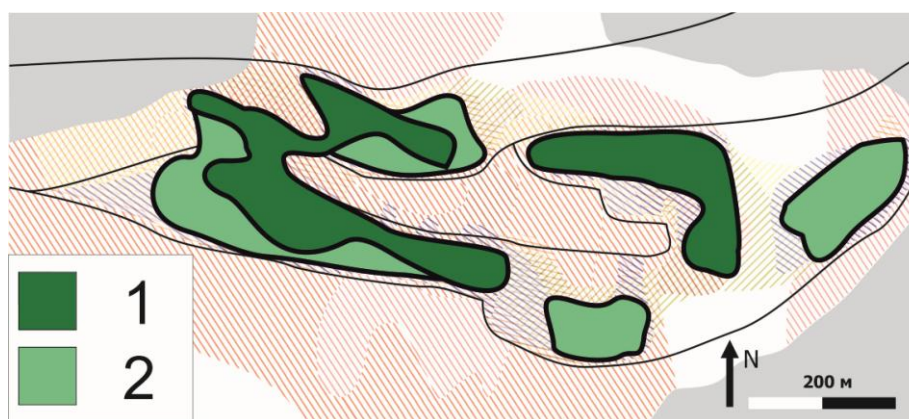


Рис. 18. Результат наложения карт распределения промышленных минералов. 1. – комплексные руды трех минералов. 2.- комплексные руды двух минералов.

Можно выделить следующие природные типы комплексных руд и вмещающие эти руды породы (в скобках указана площадь, занимаемая породой на плане в пределах съемки и расчетный объем на основании структурных наблюдений):

I. Преимущественно гранатовые руды. 1. Гранатовые амфиболиты – **Grt I-Pl-Am** (303885 м²/12155400 м³), 2. Гранат-биотитовые гнейсы – **Grt I-Bt-Pl-Qtz** (2693 м²/107720 м³); 3. Гранат-кварцевые метасоматиты – **Grt-III-Qtz+/-GrtII** (26713 м²/1068520 м³); б/н. Гранатиты – **Grt+/-Cal+/-Turm+/-Qtz+/-Chl** (локальные тела, не брались в расчет)

II. Преимущественно гранат-ставролит-кианитовые руды. 4. Основные метасоматиты по субстрату внешних зон метасоматоза кислотной фации Grt-Ky-Qtz состава - (**Grt I/II+Grt III)-St-Ky-Qtz+/-Ms** (21110 м²/844400 м³); 5. Внешние зоны кислотного метасоматоза по Am-Vt гнейсам – **Pl-Ky-Grt-Qtz-Bt** (5408 м²/162240 м³); 6. Основные метасоматиты гранат-ставролитовой фации по Am-Vt гнейсам – **Grt III-St-Pl-Qtz+/-Am** (23050 м²/691500 м³)

III. Преимущественно гранат-кианит-мусковитовые и гранат-мусковитовые руды. 7. Кварцевые метасоматиты, вмещающие оруденение Grt, сформировавшегося в условиях основной фации и мусковита, сформированного на регрессивном этапе метаморфизма синхронно с процессами метасоматоза мусковит-кварцевой фации – **Grt III-Ms-Qtz** (74513 м²/2980520 м³); 8. Гранат-мусковитовые гнейсы - **Grt I-Ms-Pl-Qtz+/-Grt II** (32026 м²/1281040 м³); 9. Поздние кислотные метасоматиты по субстрату внешних зон метасоматоза кислотной фации Grt-Ky-Qtz состава (ранние метасоматиты) - **Grt II-Ky-Ms-Qtz+/-Grt III** (135891 м²/5435640 м³); 10. Продукты кислотного метасоматоза двух последовательных этапов по субстрату Am-Vt гнейсов – **Qtz-Grt-Ky-Ms+/-Am** (69417 м²/2082510 м³).

Распределение содержаний промышленных минералов на треугольной диаграмме Grt-Ms-Ky+St (рис 19) подтверждает, что границы природных типов руд коррелируют с заявленными петрографическими и петрологическими характеристиками. Для диаграммы выбирался вариант отображения состава комплексной руды (содержание всех полезных компонентов сведено к 100%), при этом кианит и ставролит были сведены в единую ось как совместно встречающиеся и обладающие схожей плотностью и специализацией минералы. Результаты показывают, что гранатовые руды представлены метаморфическими комплексами и, реже, метасоматитами внутренних зон с явным наложением основного метасоматоза ставролит-гранатовой фации на продукты кислотного выщелачивания. Гранат-мусковит-кианитовые и гранат-мусковитовые руды с относительным содержанием Ms>20 отн. %, Grt>30 отн. % и Ky+St<30 отн. % представлены мусковитизированными на этапе кислотного выщелачивания мусковит-кварцевой фации метаморфическими породами и внешними зонами метасоматоза (метасоматиты I). Гранат-кианит-ставролитовые руды с относительным содержанием Ky+St >32 отн. %, Grt>27 отн. % и Ms <30 отн. % представлены преимущественно промежуточными и внутренними зонами метасоматоза, сочетающими комплементарные элементы метасоматических колонок разных фаций и частично отвечающими составам хизовааритов. Выбывающиеся на рис. 19 значения иллюстрируют редко проявленные метасоматиты внутренних зон с низким содержанием граната. Амфибол-

биотитовые гнейсы представлены единичным анализом гранатсодержащей породы, которая, вероятно, является продуктом метасоматических процессов, так как первоначальный состав амфибол-биотитовых гнейсов не включает оцениваемые промышленные минералы.

Количественное содержание промышленных минералов в породах отражено на диаграмме (рис. 20) которая отражает разделение всех руд месторождения на три типа и показывает, что массовое содержание промышленных минералов может достигать 75%.

Таким образом на месторождении «Высота-181» установлены три природных типа комплексных руд, отличающихся по составу и содержанию граната, ставролита, кианита, мусковита. Связь природных типов гранатовых и природных типов комплексных руд заключается в том, что гранат метаморфического генезиса (**Grt I**) характерен для I типа комплексных руд (гранатовые руды). Для природных типов комплексных руд, связанных с метасоматитами, характерно присутствие Grt II и Grt III.

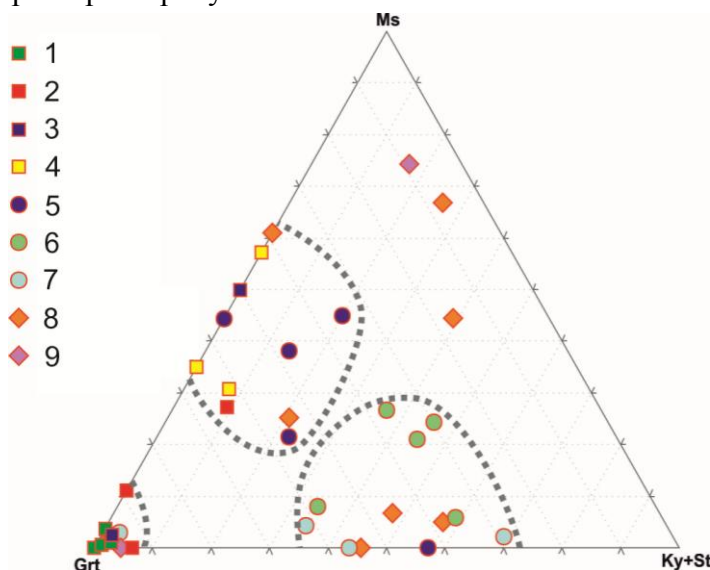


Рис. 19. распределение минеральных составов комплексных руд на диаграмме $Ky+St - Ms - Grt$. 1. Гранатовые амфиболиты; 2. гранат-биотитовые гнейсы; 3. амфибол-биотитовые гнейсы (метасоматизированные); 4. гранат-мусковитовые гнейсы; 5. поздние кислотные метасоматиты по субстрату передовых зон метасоматоза кислотной фации $Grt-Ky-Qtz$ состава; 6. основные метасоматиты по субстрату передовых зон метасоматоза кислотной фации; 7. промежуточные зоны кислотного метасоматоза по гнейсам; 8. кварцевые метасоматиты; 9. гранатиты.

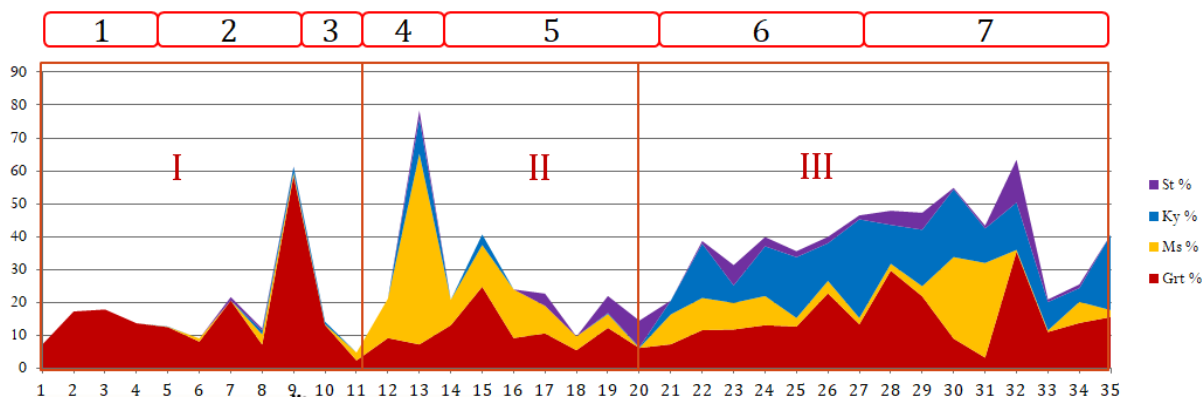


Рис. 20. Диаграмма, отражающая количественные содержания промышленных минералов в пробах. Верхняя нумерация в подписи к рис. 19. Нижние номера отражают отдельные пробы.

Подсчет прогнозных ресурсов проводился на основании данных по средним содержаниям минералов в МТП, объемам пород. Результаты подсчета сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Подсчет прогнозных ресурсов промышленных минералов.

	Площадь подсчета, тыс. кв. м.	Мощность слоя, м.	Объем породы, тыс. куб. м.	Среднее объемное содержание минерала в руде, д. ед.				Кэф. Надежности.	Объем руды, тыс. куб. м.				Прогнозные ресурсы, тыс. т			
				Gr t	Ky	Ms	St		Gr t	Ky	Ms	St	Gr t	Ky	Ms	St
I. Преимущественно гранатовые руды.																
1	303885	40	12155	0,14	0	0	0	0,8	1361,4	0	0	0	5854,02	0	0	0
2	2693	40	108	0,12	0	0,013	0	0,8	10,34	0	1,12	0	44,462	0	3,0912	0
3	26713	40	1069	0,12	0	0	0	0,5	64,11	0	0	0	275,673	0	0	0
		Всего	13332					Все го	1435,86	0	1,12	0	6174,198	0	3,0912	0
II. Преимущественно гранат-ставролит-кианитовые руды.																
4	21110	40	844	0,134	0,182	0,069	0,012	0,8	90,52	122,94	46,61	8,11	389,236	437,6664	128,6436	30,007
5	5408	30	162	0,196	0,167	0,02	0,04	0,8	25,44	21,68	2,6	5,19	109,392	77,1808	7,176	19,203
6	23050	30	692	0,141	0,035	0,045	0,055	0,8	78	19,36	24,89	30,43	335,4	68,9216	68,6964	112,591
		Всего	1698					Все го	193,96	163,98	74,1	43,72	834,028	583,7688	204,516	161,764
III. Преимущественно гранат-кианит-мусковитовые и гранат-мусковитовые руды.																
7	74513	40	2981	0,107	0,08	0,15	0	0,8	255,13	190,75	357,66	0	1097,059	679,07	987,1416	0
8	32026	40	1281	0,157	0,01	0,108	0	0,8	160,9	10,25	110,68	0	691,87	36,49	305,4768	0
9	135891	40	5436	0,196	0,167	0,1	0,04	0,6	639,23	544,65	326,14	130,46	2748,689	1938,954	900,1464	482,702
10	69417	30	2083	0,05	0,105	0,43	0	0,5	52,06	109,33	447,74	0	223,858	389,2148	1235,7624	0
		Всего	11780						1107,33	854,98	1242,22	130,46	4761,519	3043,7288	3428,5272	482,702
		Итого							2737,14	1018,97	1317,44	174,18	11769,702	3627,5332	3636,1344	644,466

В качестве коэффициента надежности применялись значения, наиболее корректные для конкретных пород. Плотность минералов принималась в соответствии со справочной литературой: гранат (альмандин) – 4,3 г/см³, кианит – 3,56 г/см³, мусковит – 2,76 г/см³, ставролит – 3,7 г/см³ [Краткий физико-технический справочник, 1960; Материаловедение, 2005; Булах, 2008].

Прогнозные ресурсы составляют:

Гранат I типа (Grt I) – 6,52 млн. т.

Гранат II типа (Grt II) – 2,65 млн. т.

Гранат III типа (Grt III) – 2,6 млн. т.

Итого: гранат всех типов – 11,77 млн. т.

Кианит – 3,63 млн. т.

Мусковит – 3,64 млн. т.

Ставролит – 0,64 млн. т.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать ряд выводов:

1. Месторождение «Высота-181» расположено в пределах южного фланга структуры и приурочено к осадочно-вулканогенной СТА, подобно месторождениям северного фланга. Отличительными чертами месторождения является малая мощность элементов разреза, более сложная, коллажированная структура и интенсивная базификация пород.
2. Месторождение комплексных гранатовых руд «Высота-181» относится к группе метаморфогенных, сформированных в результате полихронных метаморфических, метасоматических и тектонических событий в пределах неоархейской Хизоваарской структуры Тикшеозерской гранит-зеленокаменной области.
3. Главный фактор контроля руд определяется литологическими особенностями вмещающих пород
4. Метасоматоз кислотных и основных фаций формирует Grt-St-Ky-Ms-Qtz и Grt-Ms-Qtz метасоматиты и составляет более половины объема всех оруденелых пород месторождения.
5. В пределах месторождения выделено три природных типа гранатовых руд метаморфического и метасоматического генезиса, отличающихся по составу, зональности, парагенетическим ассоциациям с другими минералами.
6. На основании анализа разновидностей комплексных руд выявлены и описаны три типа комплексных руд, различающиеся по полиэтапным условиям формирования и пространственному положению. Установленная полиэтапность формирования природных типов руд месторождения нашла отражение в выделяемых технологических типах руд.
7. Выделены два технологических типа комплексных руд: а) гранатовые, гранат-кианит-ставролитовые и гранат-кианитовые руды, связанные с метаморфитами и метасоматитами промежуточных зон (комплементарный продукт полиэтапных метасоматических процессов раннего кислотного выщелачивания и более поздней базификации); б) гранат-мусковитовые руды связаны с биотитсодержащими породами, испытавшими интенсивную мусковитизацию на регрессивном этапе метаморфизма свекофеннского тектоно-магматического цикла. Второй, не исключаяющий первый, механизм формирования гранат-мусковитовых и гранат-кианит-мусковитовых руд связан с поздним этапом кислотного выщелачивания мусковит-кварцевой фации.
8. На основании структурного анализа методом прямых расчетов получены данные о прогнозных ресурсах. Ресурсы гранатовой руды всех типов оцениваются в 11,77 млн. т., что уточняет уже имеющуюся информацию (ресурсы ранее оценивались в 12 млн. т. для меньшей области подсчета [Гранатовые руды Карелии, 2009]).

Таким образом, результаты работы могут быть использованы для уточнения характеристик месторождения «Высота-181» и составление подробной схемы оценочных и разведочных работ для комплексных гранатовых руд. Результаты работы описывают общие для всех объектов Хизоваарского рудного поля механизмы формирования руд и применимы при изучении метаморфогенных месторождений, сформированных в пределах шовных зон в условиях регионального метаморфизма.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Никифоров А.Г. Факторы контроля комплексных гранатовых руд месторождения «Высота-181» // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2017. № 11. С. 43-58.
2. Никифоров А.Г. Рудная минерализация южного крыла Хизоваарской структуры // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2018. № 11. С. 134-140.
3. **Никифоров А. Г.** Бубнова Т. П. Геолого-технологическое картирование промышленных типов мусковитовых руд проявления Восточная Хизоваара (республика Карелия) // Обогащение руд. 2018. № 5. С. 49-56.

4. **Никифоров А.Г.**, Ручьев А.М. Ресурсы граната и редких металлов на рудопроявлении "Высота-181" (Северная Карелия) // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. № 10. Сер. Геология Докембрия. 2019. С. 62-70

2. в прочих изданиях:

1. Щипцов В.В., Скамницкая Л.С., Бубнова Т. П. **Никифоров А. Г.** Оценка влияния метаморфогенно-метасоматических процессов на качество промышленных минералов (на примере проявления гранатовых руд «Высота-181» Северной Карелии. Материалы международного совещания «Плаксинские чтения-2013». «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья Томск. 2013.
2. Shchiptsov V.V., Scamnitskaya L.S., Bubnova T.P., **Nikifirov A.G.** Genetic types and problems in the enrichment of garnetiiferous rocks (Karelia, Russia) // Abstracts of the International conference "The Arctic Days. Mineral Resources.- Tromsø: Geological Survey of Norway, 2014.
3. Никифоров А. Г. Корреляция результатов минералого-технологического картирования с геологическими условиями участка «Высота-181» // Сб. статей IX Российского семинара по технологической минералогии «Технологическая минералогия природных и техногенных месторождений». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 149-153.
4. Никифоров А. Г. Пространственно-генетическая связь комплексных гранатовых руд проявления «Высота-181» с полиминеральными кислотными метасоматитами // труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. 2016. С. 241-243.
5. Никифоров А. Г. Условия формирования и минералого-технологические свойства кварца месторождения «Высота-181». // Сб. статей X Российского семинара по технологической минералогии "Роль технологической минералогии в получении конечных продуктов передела минерального сырья". Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2016.
6. Bubnova T., **Nikiforov A.** Problems of complex processing of garnet ores // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016, SGEM2016 Conference Proceedings, June 28 - July 6, 2016, Book1, Vol. 2, 1167-1174 pp.
7. Nikiforov A. High-alumina industrial mineral distribution in the complex ores of Vysota occurrence // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016, SGEM2016 Conference Proceedings, June 28 - July 6, 2016, Book1, Vol. 1, 233-240 pp.
8. Shchiptsov V., **Nikiforov A.** Contribution of metasomatic processes to the formation of industrial minerals in the Khizovaara ore field, Republic of Karelia, Russia. // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016, SGEM2016 Conference Proceedings, June 28 - July 6, 2016, Book1, Vol. 1, 125-132 pp.
9. Nikiforov A. Metamorphic and metasomatic ore control of Khizovaara structure deposits. // SGEM2018 GeoConference Proceedings. STEP 92 Technology Ltd, 51 "Alexander Malinov" Blvd, 1712 Sofia Bulgaria 2018, Vol. 1.1.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ТЕРМИНОВ И СОКРАЩЕНИЙ

МТП – малая технологическая проба

РСА – рентгено-структурный анализ

РФА – рентгено-флуоресцентный анализ

СТА – стратотектоническая ассоциация

ТГЗО – Тикшеозерская гранит-зеленокаменная область