

Институт геологии - обособленное подразделение Федерального
государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра
"Карельский научный центр Российской академии наук"

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, минерагения

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук**

***Научный руководитель: профессор ПетрГУ, доктор геолого-
минералогических наук, старший научный сотрудник Щипцов Владимир
Владимирович***

Москва - 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список используемых терминов и сокращений.....	4
Введение.....	6
Глава 1. История геологического изучения Хизоваарской структуры.....	15
Глава 2. Геологическое строение и положение Хизоваарской структуры	20
2.1 Тикшеозерская гранит-зеленокаменная область.....	20
2.2 Геологическое строение Хизоваарской структуры.....	22
2.3 Метаморфизм и метасоматоз в пределах Хизоваарской структуры.....	26
Глава 3. Месторождение «Высота-181».....	35
3.1 Положение и общие сведения о месторождении «Высота-181»...35	
3.2 Методология проведенных работ.....	36
3.3 Геологическое строение месторождения	38
3.4 Корреляция состава вмещающих пород с базальтами и андезибазальтами осадочно-вулканогенной СТА.....	60
Глава 4. Факторы контроля комплексных гранатовых руд.....	66
4.1 Литологические факторы.....	68
4.1.1 Пространственная связь с амфибол-биотитовыми гнейсами .69	
4.1.2 Пространственная связь с амфиболитами	69
4.1.3 Пространственная связь с гранат-биотитовыми гнейсами	71
4.2 Структурные факторы.....	71
4.2.1 Синрудный деформационный режим.....	72
4.2.2 Пострудный деформационный режим.....	75
4.3 Метаморфогенно-метасоматические факторы.....	76
4.3.1 Региональный метаморфизм.....	76
4.3.2 Кислотный метасоматоз кианит-кварцевой фации.....	76
4.3.3 Кислотный метасоматоз мусковит-кварцевой фации.....	76
4.3.4 Основной метасоматоз ставролит-гранатовой фации.....	77

4.3.5 Fe-Mg метасоматоз, сопряженный с кислотным выщелачиванием (процесс переотложения).....	78
Глава 5. Состав руд.....	82
5.1 Гранат и стадии его формирования	82
5.2 Кианит.....	96
5.3 Ставролит.....	101
5.4 Мусковит.....	103
5.5 Кварц.....	105
5.6 Другие рудные минералы.....	106
Глава 6. Природные и технологические типы комплексных руд	
6.1 Методика минералого-технологического картирования.....	107
6.2 Природные типы комплексных руд.....	110
6.3 Технологические типы комплексных руд.....	121
Заключение.....	128
Список литературы.....	130
Список печатных работ по теме диссертации.....	149

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

Природный (геологический) тип руды — руда, обладающая относительно устойчивыми минеральным составом, текстурой и структурой, специфическими физическими свойствами, имеющая достаточно четкую пространственную обособленность. Название природного типа руды дается на основе главных рудообразующих минералов.

Природная разновидность руды выделяется на основе более мелких признаков: присутствие второстепенных и редких минералов, минералов — носителей полезных и вредных примесей, текстурно-структурных особенностей и др.

Технологический тип руды — руда устойчивого минерального и химического состава, которая перерабатывается по определенной схеме обогащения. Основное условие выделения технологического типа — возможность его раздельной добычи и переработки. Технологический тип руды может быть связан с разными по генезису и структурно-текстурным характеристиками породами и объединять несколько природных типов руд [Изоитко, 1997]. Технологический тип подразделяется на сорта.

Технологический сорт руды — руда, имеющая общую для данного технологического типа схему переработки, но отличающаяся технологическими

показателями переработки (например, извлечение, содержание индустриального минерала в концентрате). Технологический сорт может соответствовать природной разновидности руд в составе природного типа руды, отличающейся качеством руды.

Протолит – исходная порода для метаморфитов.

Субстрат – метаморфическая порода, которая под действием флюида превращается в продукт метасоматоза.

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 всего твердого сырья [Kuzvart, 2006]. 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 современности области его использования интенсивно расширяются [Mineral commodity summaries, 2020]. Наиболее предпочтительным в коммерческом отношении является альмандин, благодаря высокому (среди гранатов) удельному весу и устойчивости к деградации [Harben, 1995]. 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, мультисредние 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 ADVAT'X 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 PT 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 Subcommittee 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 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, 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. Также им проводилась обработка и научная интерпретация полученных результатов, осуществлены статистические расчеты и моделирование.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 151 страницах машинописного текста и состоит из введения, шести глав и заключения; включает 66 иллюстраций, 17 таблиц и списка литературы из 131 наименования.

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 коллектива Отдела минерального сырья ИГ КарНЦ РАН. Приведена 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 классифицированы 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. Доказано 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.

Глава 1. История геологического изучения Хизоваарской структуры

Начало изучения Хизоваарского кианитового проявления (первое упоминание относится к 1929 г. (Артамонов и др.) связано с попытками поиска руд алюминия в регионе для нужд авиационной промышленности [Щипцов и др. 2011]. В 1939 году Н. А. Волотовская в процессе детальной геологической съемки открыла крупное месторождение кианитовых сланцев в районе горы Хизовара (Лоухский район, Северная Карелия). Несмотря на то, что в эти годы уже появились первые материалы по гранатовым месторождениям (Шуерецкое и Тербеостров), в районе г. Хизоваара проводится оценка только кианитовых руд [Материалы по полевым шпатам и гранатам Карелии, 1935].

Предварительные исследования проявления показали среднее содержание кианита в рудных линзах на уровне 15-20%, а в отдельных горизонтах до 30-35%. Несколько позже, на базе Механобра была получена «удовлетворительная» схема обогащения с извлечением кианитового концентрата для высоких огнеупоров и силуминового производства. На основании этих результатов была поставлена задача проведения детальных поисковых и разведочных работ. В 1940 году в процессе съемочных, разведочных и опробовательских работ была выделена Хизоварская свита кристаллических сланцев и амфиболитов архейского возраста [Борисов, Волотовская 1941]. В структурном отношении Хизоваарская свита была описана как замок синклинальной складки, осложненной мелкими складками и сбросами. При геологической съемке были оконтурены три перспективных линзы кианитовых руд – северная, южная и восточная. Данные линзы в основном были сформированы кварц-кианитовыми сланцами со сложным петрографическим составом. Позже, той же группой исследователей, под руководством Н. А. Волотовской было проведено доизучение пород свиты [Волотовская, Жиров, 1948]. В результате метаморфические комплексы были разделены следующим образом:

1. Сланцы мусковитовые, двуслюдяно-гранатовые, мусковит-гранатовые;

2. Гнейсы биотитовые, биотит-гранатовые и биотит-амфиболовые;
3. Амфиболиты полевошпатовые и гранатовые.

В целом сланцы и гнейсы были описаны авторами как породы глубокометаморфизованной седиментогенной толщи с составом от глинистых песчаников и глин до огнеупорных глин.

Промышленная разведка, проводившаяся Северо-Западным геологическим управлением 1940-1941 гг. [Буданов, Жуков, 1941ф] и 1952-1953 гг. [Быстрова и др. 1953ф] подтвердила существование в районе горы Хизоваара на тот момент крупнейшего месторождения кианита в Карелии (месторождение «Хизоваара» [Минерально-сырьевая база Карелии, 2006]. Первые сведения о гранатсодержащих породах перспективного участка «Высота-181» появились в результате геологических работ, проводимых Северной поисково-разведочной экспедицией в середине пятидесятых годов под руководством Е. П. Чуйкиной [Чуйкина, 1956]. С этого момента на обоих флангах Хизоваарской структуры были выявлены руды промышленных минералов.

Позже, Хизоваарская свита была описана К. О. Кратцем [Геология карелид Карелии, 1963]. В ее составе были выделены несколько горизонтов высокоглиноземистых сланцев, а само Хизоваарское месторождение кианита было отнесено к нижнепротерозойским образованиям. При этом, наиболее перспективной считалась «Южная линза» месторождения, расположенная между озером Верхним и рекой Боровая. Балансовые запасы кианита на тот момент оценивались как $V+C_1 - 2881$ т. $C_2 - 1558$ т. Забалансовые запасы оценивались как $C_1+C_2 - 21$ тыс. т [Геология СССР, 1960].

В дальнейших работах разрез Хизоваарской свиты коррелировали с разрезом Ириногорско-Тикшезерской серии [Харитонов, 1966; Гилярова, 1969]. Исследованиями М. М. Стенаря, Ю. Й. Сыстры, В. В. Южановой [Стратиграфия докембрия, 1984] подтвердилась принадлежность Хизоваарской

свиты к осадочно-вулканогенным отложениям лопия. Позже Хизоваарская структура была описана как реликт андезитовой постройки Парандовско-Тикшезерского зеленокаменного пояса [Рыбаков, Мельянцеv, 1986]. Петрологические исследования [Бушмин, 1978, Послемигматитовый метасоматоз, 1983] показали интенсивное влияние на состав пород, в том числе оруденелых, процессов связанного с региональным метаморфизмом метасоматоза кислотного и основного отряда (систематика согласно [Петрографический кодекс, 2009]). Масштабные работы, проводившиеся в то же время сотрудниками КарНЦ АН СССР, выявили следы наложенных деформаций нескольких этапов [Сыстра, Скорнякова, 1986]. Подробная характеристика кианитовых руд была приведена в 1988 г. [Хизоваарское кианитовое поле, 1988]. Коллектив авторов под руководством В. В. Щипцова обобщил и дополнил результатами геологических, структурных и геофизических исследований имеющуюся информацию о месторождениях Северного фланга Хизоваарской структуры, рассмотрел ключевые проблемы факторов контроля оруденения, так же ими был установлен фактор тектонического контроля при формирования кислотных метасоматитов (свекофеннского этапа), разработана схема обогащения главных технологических типов кианитового сырья и проведен расчет экономической эффективности освоения месторождения.

Детальное изучение стратиграфии Хизоваарской структуры и петрологии формирующих ее пород проводилось коллективами под руководством В. Н. Кожевникова и А. А. Щипанского [Кожевников, 1992, 1995, 2000; Кожевников и др., 2005; Кожевников, Щипанский, 2008; Thurston, Kozhevnikov, 2000], [Щипанский и др., 1999; Shchipansky et al., 1998, 2004], и другими исследователями [Бибикова и др., 2003; Самсонов и др., 2000]. В 2002 году вышел отчет [Родионов В. С., 2001], включавший в себя данные буровых работ и специальных геофизических исследований на участке «Восточная

Хизоваара», характеризовавших объект как перспективную площадку для добычи кварц-мусковитового (серицитового) сырья.

Изучение метаморфогенно-метасоматических комплексов Хизоваарской структуры под «другим углом зрения» приобрело особое значение в свете попыток выделения новых и нетрадиционных видов сырья в регионе. Коллектив авторов ИГ КарНЦ РАН в 2009 году представил подробный технологическо-экономический вариант освоения гранатовых руд проявления «Высота-181» [Гранатовые руды Карелии, 2009]. Также была составлена геологическая схема этого перспективного участка (рис. 1.1).

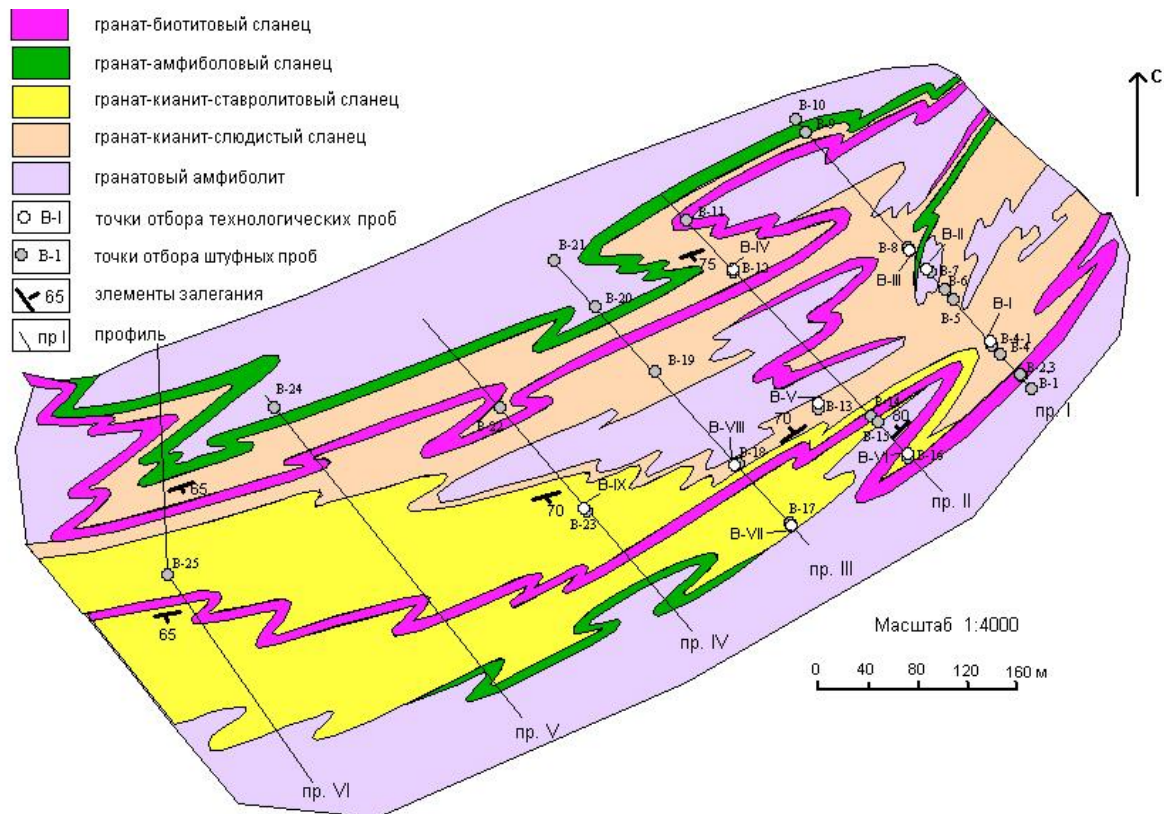


Рис. 1.1. Схема проявления «Высота-181» Составитель: Гаранжа А. В. [Гранатовые руды Карелии, 2009]

На схеме геологического строения участка выделены области развития гранатсодержащих пород с кианитом, мусковитом и ставролитом. В общих чертах видны районы развития гранат-кианит-ставролитовых метасоматитов центральной линзы, обрамление амфиболитов и внешние метасоматические

зоны. К сожалению схема не отражает условия и возможные причины (или механизмы) формирования руд. По результатам исследований 2000-2002 г. [Щипцов и др., 2002] сделан вывод, что руды могут быть легко обогатимы методом магнитной сепарации в сочетании с гравитационной сепарацией. А присутствие в финальных концентратах ставролита делает концентрат месторождения нетрадиционным и окончательное заключение об эффективности такого продукта в качестве абразива можно сделать только после отраслевых испытаний.

Выводы:

Условия образования руд Северного фланга Хизоваарской структуры и их стратиграфическая принадлежность хорошо изучены. Минерагеническое значение имеют породы, относимые по содержанию Al_2O_3 к умеренно- и высокоглиноземистым. Выделены рудоконтролирующие субмеридианальные деформации и кислотное выщелачивание, связанное со свекофеннским этапом метаморфизма. При этом месторождение гранатовых руд «Высота-181» было оценено и представлено в минерально-сырьевой базе региона с ресурсами P_1+P_2 12 млн. тонн гранатовой руды.

В данной работе автором используется предложенное В. Н. Кожевниковым описание стратотектонических ассоциаций (СТА) Хизоваарской структуры, удобное для описания структурно-формационных типов оруденения.

Глава 2. Геологическое строение и положение Хизоваарской структуры

2.1. Тикшеозерская гранит-зеленокаменная область

Хизоваарская структура является 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. 2.1.1). Зеленокаменная 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]. Зеленокаменная 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 вулканогенно-тектоническая структура принадлежит к зеленокаменной части ТГЗО, ее границы определены в районе озера Верхнее Лоухского района Республики Карелия.

На Государственной геологической карте Хизоваарская структура обрамляется нижнелопийским мигматит-плагиогранитами, гнейсоплагиогранитами и плагиогранитами Кестеньгского комплекса. Породы структуры представлены амфиболитами гранатовыми, гранат-полевошпатовыми, диопсид-гранатовыми, плагиосланцами и кристаллосланцами, роговообманковыми, пироксенсодержащими, гнейсами

гранат-биотитовыми, двуслюдяными, кварц-кианитовыми, гранат-кианит-ставролитовыми и гранат-кианит-биотитовыми.

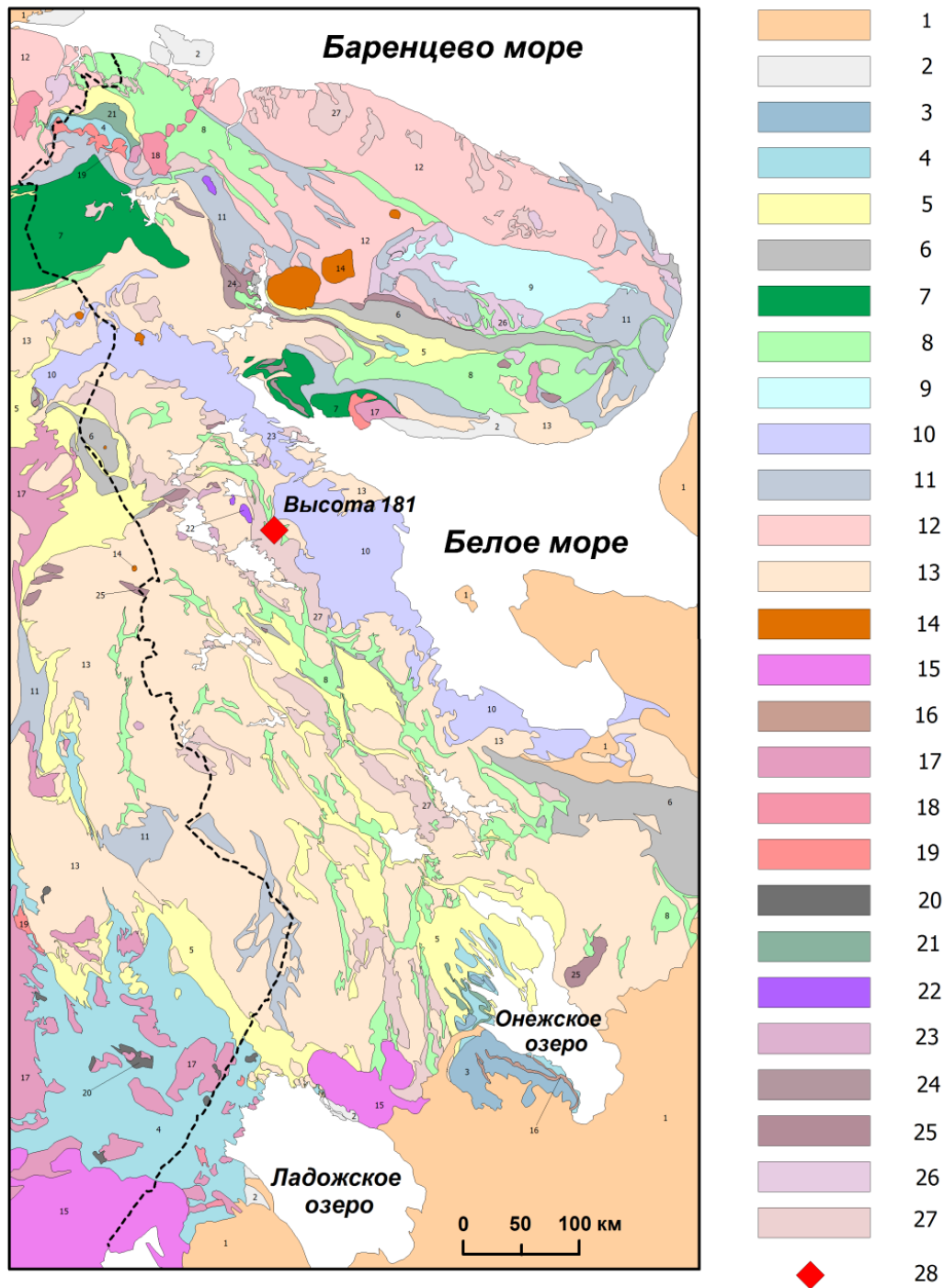


Рис. 2.1.1. Обзорная геологическая карта Карело-Кольского региона

(использованы: Геологическая карта Кольского региона [редактор Ф.П.Митрофанов, Анапиты, 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-

людиковый; 6 – сумий и сариолий нераслененные; 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 – анортозит-рапакивигранитные комплексы (1.7 – 1.5 млрд лет); 16 – габбродолериты (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 – анортозиты, 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».

Все породы структуры испытали полихронные этапы регионального метаморфизма палеоархейского, неоархейского и протерозойского периодов, полицикличные метасоматические и тектонические процессы. К Южному и Северному флангам структуры приурочена рудная минерализация [Кианитовое поле., 1988, Родионов, 2001, Минерально-сырьевая база., 2006, Никифоров, 2018].

2.2. Геологическое строение Хизоваарской структуры

Геологическую изученность Хизоваарской структуры можно оценить как высокую, особенно по сравнению с прилегающими территориями [Корсакова, 2000]. Поверхность территории Хизоваарской структуры представляет собой грядово-холмистую равнину с относительно резкими изменениями рельефа. В пределах гряд практически всегда находятся участки с обнажениями скального массива, ниже по рельефу они перекрываются ледниковыми отложениями преимущественно песчаного состава и моренными грунтами.

Гидрографическая сеть представлена озером Верхнее, рекой Боровая и большим количеством мелких озер (ламбин). Большинство водных объектов образовались на месте тектонических впадин, частично измененных ледниковыми процессами. К понижениям рельефа приурочены и болотистые участки с мощностью торфа до 4 м. Подобная геоморфологическая обстановка делает обычной ситуацию, при которой к локальным повышениям рельефа приурочены наиболее доступные для изучения участки. В частности, основной объект исследований, месторождение «Высота-181» расположено на безымянной высоте (181 м.) вблизи склона г. Шариваара, наиболее высокой точки в пределах структуры (218 м.) и на некоторых участках имеет почти 100% обнаженность дочетвертичных пород на площадях более 1500 кв. м.

Хизоваарская структура представляется собой синклиналию складку с субширотным шарниром [Кожевников и др., 2005]. Породы Хизоваарской структуры хорошо 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, переслаиваемыми с толеитовыми базальтами. Возраст толщи 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 толщи залегают андезиты, выше проявлены осадочно-вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы (двуслюдянными 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 грубообломочными вулканитами (конгломератами и туфами) и metabазальтами.

Геологическое строение Хизоваарской структуры и сопряженных территорий отражено на рис. 2.2.1.

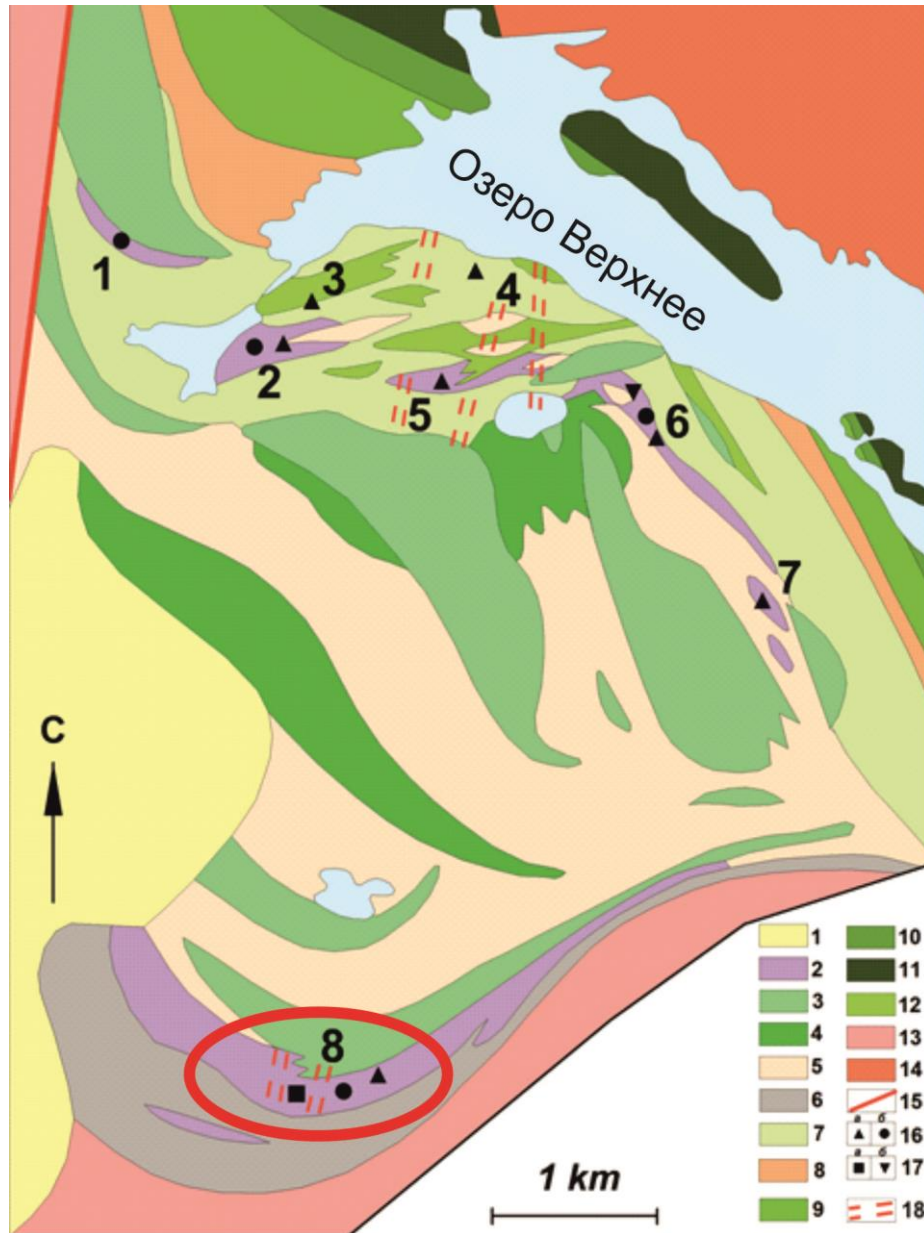


Рис. 2.2.1. Схема Хизоваарского рудного поля с главными месторождениями [Shchiptsov, Nikiforov, 2016]. Условные обозначения: 1 – четвертичные отложения; 2 – метасоматиты стадии кислотного выщелачивания; 3 – базальтовые лавы подушечного типа, силлы ультрабазитов; 4 – фельзитовые туфы, лавобрекчии; 5 – метадациты и метариолиты; 6 – силлы габбро; 7 – осадочно-вулканогенные и терригенные метаосадки; 8 –

метаандезиты, гипербазитовые бониниты и базальты: 9- метажелезистые базальты; 10 – бонинитовые серии метавулканитов; 11 – магнезиальные базальты с телами перидотитовых кумулатов. Интрузивные и субвулканические породы: 12 – тела субвулканических 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 кианиовые 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».

При описании месторождений полезных ископаемых, связанных с Хизоваарской структурой, традиционно употребляется термин Хизоваарское рудное поле [Кианитовое поле., 1988], что удобно при поисково-оценочных исследованиях. На данный момент в составе Хизоваарского рудного поля выделяются и описаны следующие месторождения [Кианитовое поле., 1988, Родионов, 2001, Минерально-сырьевая база., 2006, Никифоров, 2018]:

Северный фланг структуры.

Месторождение «Хизоваара» (Южная линза и другие участки). Основное полезное ископаемое – кианит, попутное – кварц (кварцевое сырье). Месторождение приурочено к интенсивно метасоматизированным в условиях кианит-кварцевой фации кислотного выщелачивания высокоглиноземистым толщам и метаандезитам [Кианитовое поле., 1988]. Разведанные запасы категории В+С₁ – 2881 тыс. т. категории С₂ – 1558 тыс. т., забалансовые 2111 тыс. т. Среднее содержание кианита – 20,54 %. В составе месторождения (без подсчета запасов) выделены также участки «Фукситовый», «Северная линза» и другие. Данные участки характеризуются комплексными гранат-кианит-

кварцевыми рудами, при этом средние содержания кианита в них достигают 12-25%.

Месторождение «Межозерное». Основное полезное ископаемое – мусковит, попутные – кианит, кварц (кварцевое сырье). Месторождение расположено в толщах амфиболитов, амфибол-биотитовых и биотитовых гнейсов. Прогнозные ресурсы P_1+P_2 – 1990 тыс. т. среднее содержание мусковита – 17,8 %.

К Южному флангу структуры принадлежит месторождение «Высота-181», которое детально изучалось в рамках данной работы.

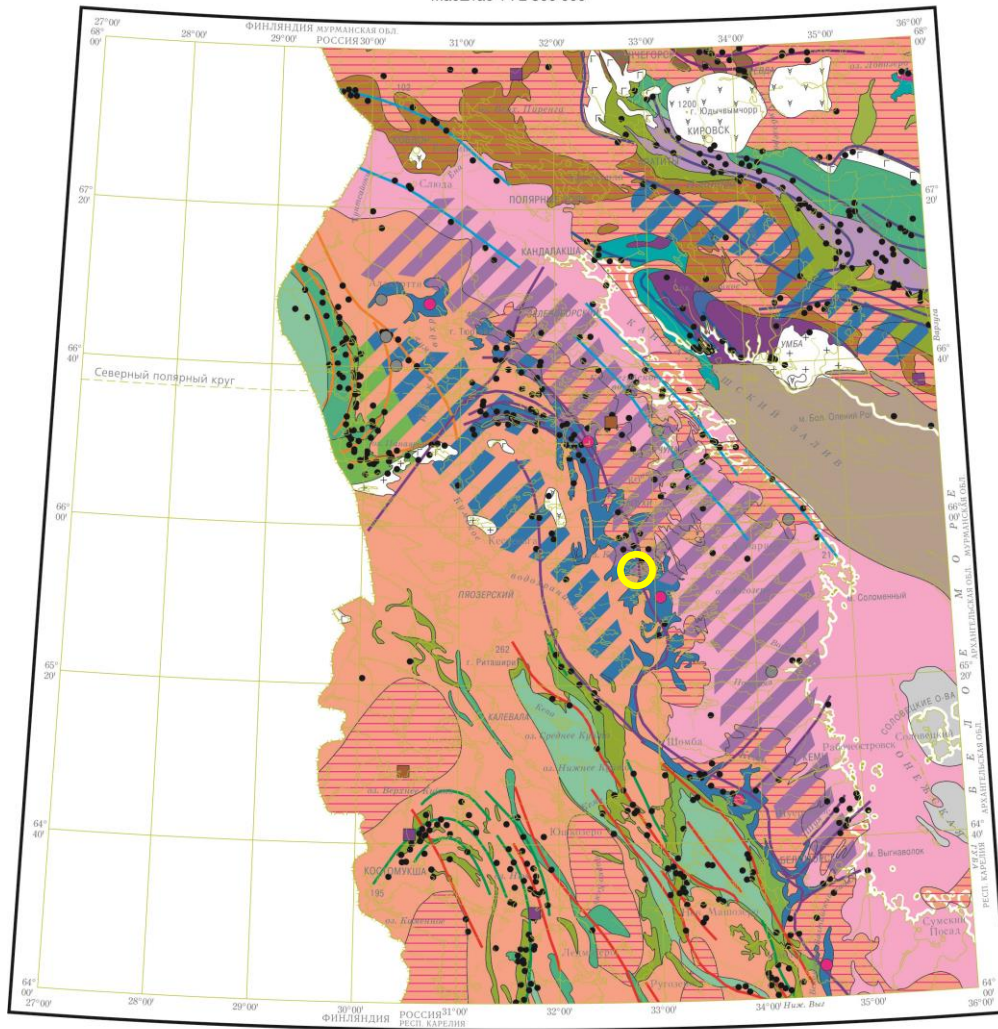
2.3 Метаморфизм и метасоматоз в пределах Хизоваарской структуры

При изучении докембрийских пород, которые в основном представлены измененными разновидностями, большую роль играет исследование метаморфических процессов, их P-T параметров и времени проявления. Для детально изученных докембрийских щитов России возможно выделить три периода регионального метаморфизма – раннеархейский, позднеархейский и раннепротерозойский [Савко, 2013]. При этом продукты более поздних этапов накладываются на метаморфические структурно-вещественные комплексы ранних периодов, создавая целый ряд формационных зон [Добрецов, 1981].

Гранит-зеленокаменные структуры Карелии не являются исключением, для них установлены и обоснованы несколько этапов метаморфизма. Как видно из схемы регионального метаморфизма и метасоматоза к государственной геологической карте (рис. 2.3.1), 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. При этом в пределах территории выделены области развития раннепротерозойских метасоматических комплексов (рис. 2.3.1). [Государственная геологическая

карта, 2012]), структурно связанных с зоной сочленения Беломорского подвижного пояса и Карельского кратона.

СХЕМА РЕГИОНАЛЬНОГО МЕТАМОРФИЗМА И МЕТАСОМАТОЗА
Масштаб 1 : 2 500 000



Автор В.В. Астафьев

У С Л О В Н Ы Е О Б О З Н А Ч Е Н И Я

ФАЦИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО МЕТАМОРФИЗМА			МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ					
Позднепротерозойский тектоно-метаморфический цикл Палеокайнозойская фация			Раннепротерозойский тектоно-метаморфический цикл					
Фации Низкое и умеренное давление / Нормальное давление / Умеренные и высокие давления			Главные группы фации / Структурные положения					
Эпидиоанфиболовая и амфиболовая метасоматическая / Гранулитовая и амфиболовая метасоматическая / Гранулитовая			Варзугский бассейн амфиболовая, кварцы следуют, биотит мусковитовый с слюдяной минерализацией, эпидио-гранит-средние метасоматы / Ауккеринский эпидиоанфиболовый и эпидио-кварцевый протилиты, эпидиоанфиболовый и кварцевый с умеренной метасоматизацией, альбит-кварцевые и карбонат-карбонатные метасоматы с субфидио-метасоматизацией, альбит-карбонатные и гранит-карбонатные метасоматы / Нангаловский эпидиоанфиболовый и эпидио-кварцевый протилиты, эпидиоанфиболовый и кварцевый с умеренной метасоматизацией, альбит-кварцевые и карбонат-карбонатные метасоматы с субфидио-метасоматизацией, альбит-карбонатные и гранит-карбонатные метасоматы / Кимовский клин: гранит-амфиболовый, гранит-биотит-амфиболовый, биотит-кварцевый, эпидио-кварцевый, эпидио-силосилитовый, карбонат-целюлитовые метасоматы, массивные слюдяные руды / Хивонский южнот-гранит-кумунитовый, гранит-биотит-розовоблаженный, стародит-корголановые метасоматы / Шуровский: квантитовый, гранитовый, кварцевый, кварц-полосчатый метасоматы. В порфирах: кварцевый, розовоблаженный-гранитовый, эпидио-розовоблаженный-гранитовый, гранит-карбонатные метасоматы / Поркубойский: пирротин-слюдяный кварцевый, пирротин-кварцевый, розовоблаженный, гранит-кварцевый, кварцевый, розовоблаженный-гранитовый, эпидио-розовоблаженный-гранитовый, гранит-карбонатные метасоматы / Сибирский: гранит-кумунитовый и кварцевый (пирротин)-гранит-карбонатные метасоматы / Ниверинский: гранит-кумунитовый, амфиболо-гранит-амфиболовый и пирротин-биотит-кварцевый, эпидио-анфиболовый, кварцевый, мусковит-кварцевый, эпидио-кварцевый, альбит-кварцевый, мусковит-кварцевый, эпидио-розовоблаженный-кварцевый метасоматы			Хивонский, березиты, березиты, альбититы, целюлиты / Протилиты, березиты, альбититы, целюлиты / Хивонский, протилиты / Хивонский / Хивонский / Хивонский		
Позднепротерозойский тектоно-метаморфический цикл			Позднепротерозойский тектоно-метаморфический цикл					
Фации Низкое и умеренное давление / Нормальное давление / Умеренные и высокие давления			Главные группы фации / Структурные положения					
Эпидиоанфиболовая и амфиболовая метасоматическая / Амфиболовая / Гранулитовая			Ринорода Варзугская грабен-саксонская, Торова-аппалачская зона и ее обрамление / Кулосерский синеклизальный, Пелавар-Современная складчатая структура / Ринорода Варзугская грабен-саксонская, Торова-аппалачская зона и ее обрамление / Беломорская складчатая метаморфическая зона / Зона сочленения Карельского кратона и Беломорской складчатой метаморфической зоны / Кольский синеклизальный, синеклизаль-Юльские холмы / Подарубо-Юльские тектоническая глыба и ее обрамление / Центральная Карельский "Блок" / Зеленокаменные и старшие глыбы Карельской глыбы-эвекские меньшей области и ее обрамление					

Рис. 2.3.1. Схема регионального метаморфизма и метасоматоза [Государственная геологическая карта, 2012]. Обведена область Хивоваарской структуры.

Изучение метаморфизма в пределах ТГЗО продолжалось на протяжении долгого времени и привело к появлению обширной теоретической базы [Володичев, 1984, Фации метаморфизма..., 1990, Гродницкий, Сибелев, 1995]. В данный момент определены два этапа метаморфизма, характерные как для всей восточной части Фенноскандинавского щита в общем, так и для отдельных ее структур в частности – лопийский (2,6-2,8 млрд. лет) [Бибикова и др., 2003] и свекофеннский (1,7-1,9 млрд. лет) [Гродницкий, Сибелев, 1995].

Лопийский этап метаморфизма связан с неархейским тектоно-магматическим циклом, для которого характерно формирование зеленокаменных поясов (в том числе Тикшеозерского – структурной части ТГЗО) и последующие метаморфические события. Данный этап характеризуется метаморфизмом фации альмандиновых амфиболитов повышенных давлений [Володичев, 1984, Ручьев, 2002, 2010]. Изучение метаморфизма лопийского этапа проводилось на ксенолитах и реликтовых участках, но и в этих случаях изменения, связанные с метаморфизмом более позднего свекофеннского этапа, не позволяют абсолютно точно определить термобарические параметры. 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]. Отмечаются также процессы, связанные с мусковитизацией пород, что соответствует более низкотемпературному метаморфизму регрессивного этапа (300-550° при 6 кбар. [Послемигматитовый метасоматоз,

1983]). На рис. 2.3.2 термобарометрические параметры свекофеннского метаморфизма попадают в поля ставролит-кианит-биотит-мусковитовой и биотит-кианит-гранат-мусковитовой субфаций амфиболитовой фации. Регрессивная стадия метаморфизма может быть оценена как принадлежащая биотит-гранат-мусковит-кианитовой субфации зеленосланцевой фации и ставролит-хлорит-кианитовой субфации эпидот-амфиболитовой фации. Метаморфические породы Северного фланга Хизоваарской структуры представлены гранатовыми и безгранатовыми амфиболитами, биотитовыми, биотит-ставролитовыми, кианит-ставролит-биотитовыми, амфибол-биотитовыми, гранат-кианит-биотитовыми, гранатсодержащими кианит-ставролит-биотитовыми гнейсами.

В пределах месторождения «Высота-181» (Южный фланг Хизоваарской структуры) выявлены гранатсодержащие амфиболиты, биотитовые и биотит-амфиболовые гнейсы. Кианит и ставролит в метаморфических породах, не испытавших метасоматических процессов, встречается в малых количествах, не превышающих 2-3%.

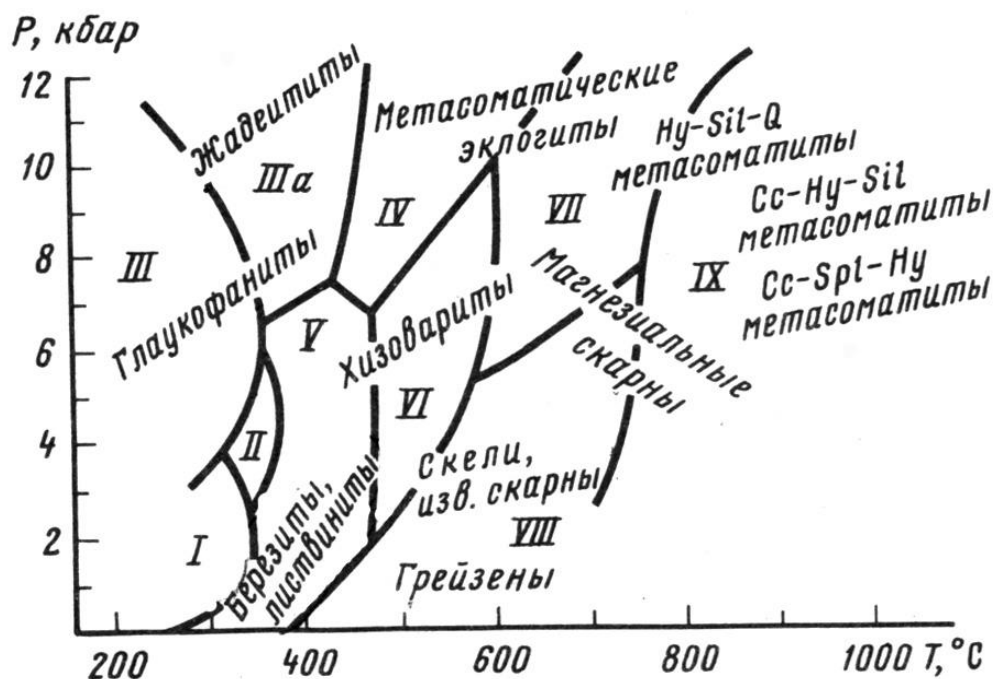


Рис. 2.3.2. а. Схема фаций и условия образования главных формационных типов метасоматитов, связанных с региональным метаморфизмом. По [Бушмин, 1989, Бушмин, Глебовицкий, 2008]:

Фации метаморфизма: I – цеолитовая; II – пумпелиит-актинолитовая; III – глаукофан-лавсонитовая; IIIa – глаукофан-гранатовая; IV – кварц-цоизит-кианитовая; V – зеленосланцевая; VI – эпидот-амфиболитовая; VII – куммингтонит-амфиболитовая; VIII – альмандин-амфиболитовая; IX – гранулитовая

Метасоматоз

В соответствии с петрографическим кодексом, метасоматоз – это реакция приспособления горной породы к изменению физико-химических условий ее существования. Он ведет к частичному или полному химическому, минеральному или структурно-текстурному преобразованию субстрата, сохраняющего при этом твердое состояние. Регулирующими факторами метасоматоза являются: а) температура, б) флюидное давление (функционально

зависящее от температуры), в) градиент химических потенциалов компонентов в системе порода-флюид, г) эволюция Eh и Ph в колонне фильтрующегося флюида [Петрографический кодекс..., 2009].

Следует подчеркнуть, что метасоматоз – важнейший компонент единой эндогенной петрологической системы, реализующийся в колонне восходящего потока эндогенного раствора, причем в верхней части колонны в зоне кондуктивного теплопереноса происходит «нормальный» метаморфизм, в промежуточной зоне конвективного переноса протекает метасоматоз, а в нижней зоне наиболее высоких температур начинается плавление [Коржинский, 1955].

Инфильтрационный метасоматоз зачастую сопровождается выносом и привносом в породу ряда химических компонентов, вызывая образование зональности. Таким образом, происходит структурирование системы с сокращением ее энтропии, что создает вероятность возникновения в ней аномальных концентраций определенных химических соединений – увеличивает вероятность формирования месторождений полезных ископаемых. Следовательно, метасоматоз принципиально отличается от метаморфизма не только термодинамикой процесса, но и способностью к рудообразованию [Бушмин, 1989; Петрографический кодекс..., 2009].

В теории метасоматических процессов одним из главных прикладных направлений является изучение пород, содержащих оруденения цветных и благородных металлов [Метасоматоз и метасоматические породы, 1998]. В метасоматизированных породах и метасоматитах размещаются месторождения меди, никеля, золота, железа, цинка и др. Но и безрудные метасоматиты, образующиеся при перемещениях вещества в процессе регионального метаморфизма, например, каолиниты, алунит, бокситы, сами по себе могут представлять интерес как полезное ископаемое [Геологическая съемка..., 1996; Голева Р.В., 2013]. Из контактово-метаморфических пород добывают такие промышленные минералы, как флогопит, корунд, гранат и графит. Безрудные

метасоматиты различного состава широко используются как конечный продукт в огнеупорной, химической, цементной и керамической промышленности [Заверткин, 2005].

Если рассматривать метасоматические горные породы в пределах Хизоваарской структуры согласно классификации, предложенной в петрографическом кодексе, то можно отнести их к классу регионально-метасоматических, формирование которых связано с региональным эндогенным тепломассопотоком. В данном случае прослеживается связь с региональным метаморфизмом свекофеннского периода. В пределах этого класса можно также выделить отряды кислотных и основных метасоматитов, получивших наибольшее развитие и являющихся рудоконтролирующими в месторождениях и проявлениях Хизоваарского рудного поля. При этом процессы основного метасоматоза чередуются с кислотными, что приводит к наложению минеральных зон и появлению характерных полиминеральных ассоциаций граната, кианита, ставролита, мусковита и кварца [Послемигматитовый метасоматоз, 1983, Проскурин, 2014].

Следует отметить, что для месторождений неметаллических твердых ПИ, каждое из которых является пороодообразующим минералом в той или иной рудовмещающей породе, метаморфизм является значимым рудообразующим фактором, а метасоматоз обеспечивает высокие содержания рудного минерала и его чистоту, напрямую влияющую на обогатимость. В связи с дифференциальной подвижностью компонентов в областях развития интенсивного метасоматоза, распределение его продуктов является зональным. Таким образом, для промышленных минералов метасоматическая зональность практически во всех случаях является рудоконтролирующей [Shchiptsov, Nikiforov, 2016; Thompson, 2015; Czarnota et al. 2018]. Пространственное распространение руд метасоматического генезиса может быть локализовано также в пределах линзовидных рудных тел, в том случае, если данные тела развивались как продукт метасоматоза в зонах сдвига при их высокой флюидной проницаемости [Novotna et al., 2015]. В случае с месторождением

Высота-181, полихронное наложение продуктов метасоматоза разной химической специализации (базификация продуктов кислотного выщелачивания, повторное кислотное выщелачивание) приводит к формированию комплексных руд [Никифоров, 2017].

Возраст пиковых метасоматических процессов по результатам U-Pb датирования циркона из фенгитовых сланцев (Северный фланг Хизоваарской структуры) составляет 1800 ± 7 млн. лет, параметры метаморфизма этих пород оцениваются как T 580-620°C и P 6,5-7,5 кбар. [Сергеев, Лобач-Жученко, 1993]. Для Южного фланга возраст метасоматической перекристаллизации оценивается как 1749 ± 64 млн. лет при T 620-650°C и P 6-7 кбар. [Проскурин, 2008]. В пользу свекофеннского возраста метасоматитов говорят и структурные данные, в частности секущие и синкинематические контакты метасоматитов к субстрату метаморфических пород свекофеннского этапа. Необходимо отметить, что фенгитовые сланцы Северного фланга Хизоваарской структуры относятся к толще мусковит-ставролит-биотитовых пород, сформированных в пределах регрессивной стадии свекофеннского метаморфизма амфиболитовой фации. Эта стадия характеризуется более низкими термодинамическими параметрами, что и обусловило появление мусковита в равновесных ассоциациях.

На данный момент основные схемы метасоматического процесса в пределах Хизоваарской структуры хорошо изучены. С.А. Бушмин детализировал метасоматические колонки для гранатовых и безгранатовых амфиболитов [Бушмин, 1978], широко развитых в пределах всей Хизоваарской структуры и слагающих значительную часть месторождения «Высота-181». В монографии, посвященной метасоматическим процессам, связанным с региональным метаморфизмом [Глебовицкий, Бушмин, 1983], рассмотрены варианты кислотного выщелачивания по различным типам пород Хизоваарской структуры, в том числе ставролит- и кианитсодержащим гнейсам. Установлен и описан механизм формирования во внутренних зонах кианитовых, кварц-

мусковитовых и кварц-мусковит-кианитовых метасоматитов. Данные комплексы пород являются рудоносными для месторождений Северного фланга Хизоваарской структуры [Волотовская, 1947, Хизоваарское кианитовое поле, 1988]. Главные рудоконтролирующие процессы метасоматоза для северного фланга структуры: кианит-кварцевая и мусковит-кварцевая фации кислотного выщелачивания, ставролит-гранатовая фация основного метасоматоза [Глебовицкий, Бушмин, 1983].

В пределах Хизоваарской структуры также описаны «хизовариты» – среднезернистые массивные кианит-амфиболовые или ставролит-амфиболовые породы, содержащие роговую обманку, лабрадор (реликтовые минералы амфиболитового протолита), кианит, ставролит, пироп-альмандинный гранат, биотит, рутил, турмалин и кварц (новообразованные минералы). Хизоварит представляет собой среднетемпературный (450–600 °С), относительно высокобарический (5–8 кбар) метасоматит – комплементарное сочетание продуктов кислотного выщелачивания с кианит-кварцевой внутренней зоной и основного метасоматоза со ставролит-гранатовой внутренней зоной. Относится к классу регионально-метасоматических пород согласно классификации Петрографического кодекса [Петрографический кодекс..., 2009].

Вывод:

Хизоваарское рудное поле объединяет месторождения и проявления комплексных руд, формирование которых связано с интенсивными метаморфическими и метасоматическими процессами, синметаморфическими тектоническими деформациями. Месторождения и проявления сформированы в виде локальных линз, при этом гранатовые руды отмечены в промышленных концентрациях только в Южном фланге Хизоваарской структуры.

Глава 3. Месторождение «Высота-181»

3.1 Положение и общие сведения о месторождении «Высота-181»

Месторождение гранатовых руд «Высота-181» расположено в Лоухском районе Северной Карелии в 27 км. к югу от п. Сосновый. Через поселок проходят автомобильная и железная дороги, соединяющие станцию Лоухи с Пяозерским леспромомхозом. Грунтовая лесовозная дорога подходит почти вплотную к участку (продуктивные участки выделяются непосредственно в пределах дороги).

Рельеф местности рассматриваемой территории характеризуется как денудационный, пересеченный, глобально связанный с древними тектоническими процессами, в понижениях рельефа аккумулятивный, ледниковый. Ориентировка геоморфологических структур субширотная. Гранатсодержащие породы хорошо обнажены на естественной поверхности. Месторождение представляет 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.

В геологическом плане месторождение расположено в юго-западной части Хизоваарской структуры [Никифоров, 2018]. Породы проявления относятся к осадочно-вулканогенной СТА и представлены коллажированными осадочно-вулканогенными, вулканогенно-осадочными стратифицированными комплексами. На обнаженной поверхности лучше всего проявлены гранат-биотитовые гнейсы, метасоматиты по ним и, реже, амфиболиты. Хуже

обнажены амфибол-биотитовые гнейсы и метасоматиты по ним, но реконструкция выходов данной толщи на поверхность возможна благодаря ее слабоскладчатому залеганию. Формирование руд месторождения связано с региональным метаморфизмом и процессами метасоматоза, общими для всей Хизоваарской структуры.

3.2. Методология проведенных работ

В рамках полевых работ периода 2012-2013 гг. были проведены детальные геологические работы с пробоотбором. Всего было зафиксировано и привязано в системе координат WGS 84 более 300 точек. Данные точки могут маркировать отдельные обнажения, части крупных обнажений, контакты между метасоматическими зонами, породами субстрата и иные представляющие интерес области. В части точек проводился пробоотбор, в случае выявления однородных по составу пород отбирались малые технологические пробы (в дальнейшем МТП). Масса МТП 20 кг., отбор проводился для максимально представительного отображения среднего состава породы. Также была организована работа на площадках статистики (методика описана в [Гранатовые руды Карелии, 2009]), в том числе на подготовленных расчистками участках. Работа на площадках статистики заключалась в подсчете площади контрастно минерализованных зон, как метасоматических, так и гнейсовых, выявление характера рудопроявления, подсчет содержания рудных минералов и их форм выделения. Все участки привязывались к конкретному природному типу руд месторождения, площадь 1 м² для каждой площадки статистики. Для геометризации руд в 2013 году была проведена нивелирная съемка относительных высот, при это абсолютная отметка поверхности была взята от ближайшего триангуляционного пункта. В таблице 3.2.1. указаны объемы выполненных полевых работ на месторождении.

В процессе полевых работ были выявлены следующие положительные характеристики месторождения, прямо влияющие на его технико-экономическую оценку:

1. Практически полная обнаженность вмещающих оруденение пород и отсутствие необходимости удаления вскрышных пород.
2. Хорошая инфраструктурная доступность, дорожная сеть (грунтовая автодорога) подходит непосредственно к центральной линзе месторождения с восточной стороны.
3. Отсутствие подземных и грунтовых вод на начальных этапах разработки (до глубин 30 м). Высотные отметки центральных оруденелых участков колеблются в диапазоне 165-183 м. Высотные отметки местной гидрографической сети, окружающей участок – 150-154 м. При отсутствии рыхлого чехла четвертичных отложений подтопление грунтовыми водами не прогнозируются в силу геоморфологических особенностей.

Таблица 3.2.1. полевые работы на месторождении «Высота-181»

Виды полевых работ	Объемы
Привязка точек	396
Отбор образцов	172
Отбор МТП	34
Количество выполненных работ на площадках статистики	8

Аналитические работы проводились на базе Института геологии Карельского научного центра РАН сотрудниками лаборатории геологии, технологии и экономики минерального сырья и лаборатории технологической минералогии (с 2018 г. - Отдел минерального сырья) и аналитической лаборатории (с 2019 г. - Аналитический центр ФИЦ КарНЦ РАН). Состав работ сведен в таблицу, отражающую объемы проделанных работ и их отражение в главах диссертации.

Таблица 3.2.2. Виды аналитических работ (без пробоподготовки) и их целевое отражение в главах и разделах диссертационной работы

Вид аналитических работ	Объем работ	Отражение результатов
Описание шлифов	132 шт. (52 авторских)	4, 5 главы
Микронзондовый анализ (СЭМ VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсным микроанализатором INCA Energy 350.	38 шт.	4, 5 главы
Определение химического состава (силикатный анализ)	Все главные породы месторождения, 24 шт.	3, 6 главы
Рентгено-флуоресцентный (с выделением петрогенных элементов) анализ (спектрометр ARL ADVAT'X)	12 шт.	3, 6 главы
Минералогический анализ	МТП из всех пород месторождения, 22 пробы.	6 глава
Рентгено-структурный анализ	Концентраты мусковита, 4 шт. Частные пробы, 6 шт.	5 глава

3.3. Геологическое строение месторождения

Промежуточным результатом полевых работ стала геологическая схема месторождения, отражающая залегание пород субстрата, петрографический состав метасоматитов и природные разновидности руд (рис. 3.3.1). Принципы картирования соответствовали минералого-технологическим задачам – выявлению и оконтуриванию природных разновидностей и типов гранатовых и комплексных руд и технологических типов руд. Методика и результаты подробно описаны в главе 7 данной работы.

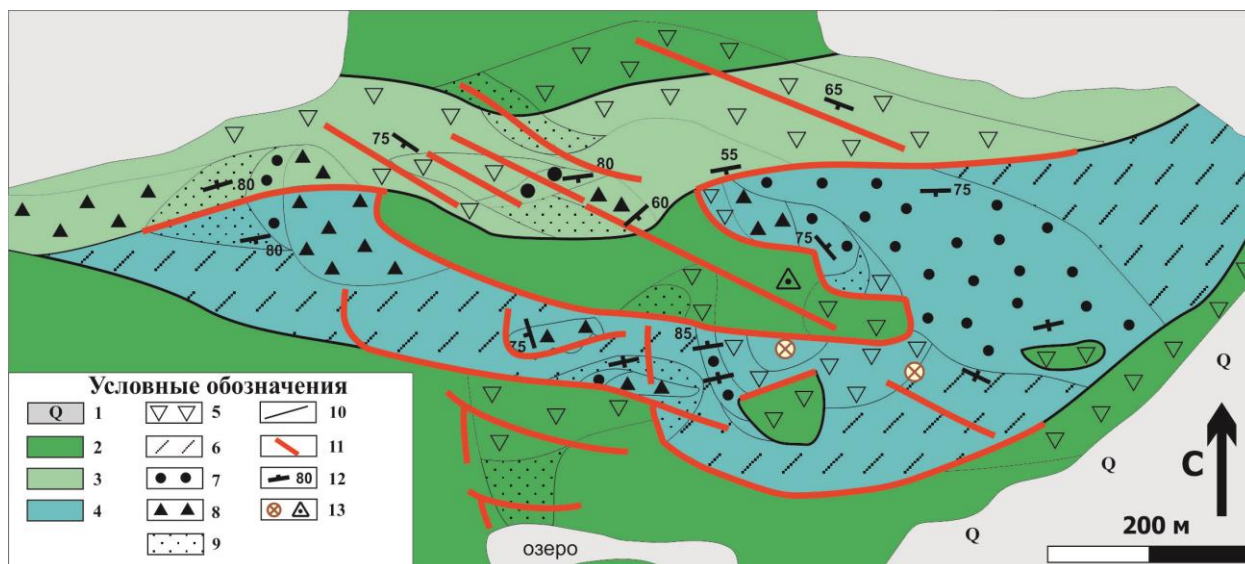


Рис. 3.3.1. геологическая схема месторождения «Высота-181».

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

Как видно из схемы, вся продуктивная толща представляет собой зоны контакта разновозрастных 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.

Метаморфические комплексы

Метаморфические породы представлены следующими разновидностями:

- амфиболиты, в том числе гранатовые – крупнозернистые темноцветные породы, с гранобластовой структурой, содержащие основной плагиоклаз, роговая обманка, кварц и порфиробластический гранат. В малых количествах

содержится циркон, эпидот, хлорит, рутил, ильменит и титаномагнетит, кальцит.

- биотит-амфиболовые и амфиболовые гнейсы – средне- и мелкозернистые породы, с чередованием амфиболовых (гранобластовая структура), биотит-плагиоклазовых (гранолепидобластовая структура) полос шириной до 10 см. Содержат основной плагиоклаз, роговую обманку, биотит, кварц и, в небольших количествах (до 3%), гранат, содержание которого возрастает в метасоматитах. В малых количествах содержится хлорит, рутил, ильменит.

- гранат-биотитовые гнейсы - средне-, мелкозернистые породы, с чередованием кварц-плагиоклазовых и биотит-кварц-плагиоклазовых (гранолепидобластовая до лепидобластовой структура) полос шириной первые сантиметры. Содержат средний плагиоклаз, гранат, биотит, кварц и мусковит, появляющийся в внешних метасоматических зонах. В малых количествах содержится хлорит, рутил, ильменит. Включения в гранате представлены среди прочих минералов, кальцитом.

Метасоматические процессы

На фоне метаморфизма протекают процессы метасоматоза. Основное рудопроявление связано именно с метасоматически измененными породами, особенностями которых являются: наличие реликтовых участков пород; метасоматическая зональность, при которой от наиболее измененных, внутренних зон к слабоизмененным внешним наблюдаются закономерности, характеризующие метасоматические процессы (рис. 3.3.4 – для амфиболитов, рис. 3.3.5 – для гранат-биотитовых гнейсов); зоны метасоматических образований пересекают структуры, литологические границы и зоны метаморфической зональности. Метасоматиты, развитые по различному субстрату имеют составы, характеризующиеся высоким содержанием граната и кианита. Часто встречается ставролит, характерна более поздняя

мусковитизация всех пород на фоне регрессивного этапа метаморфизма. Рудные метасоматиты месторождения принадлежат к кислотным (гранат-кианит-кварцевые и гранат-мусковит-кварцевые метасоматиты) и основным фациям (гранатовые, ставролитовые и гранат-ставролитовые метасоматиты). В целом сложные многокомпонентные составы метасоматитов связаны с влиянием различных по химической специализации процессов, кислотных (кианит-кварцевая и мусковит-кварцевая фация) и основных (ставролит-гранатовая фация и сопряженное с кислотным выщелачиванием переотложение железо-магнезиальных минералов. Кианит-кварцевая фация кислотного выщелачивания имеет наибольшее значение для месторождения, формируя гранат-кианитовые руды. Облик, состав и особенности формирования кианитовых кварцитов соответствуют кианит-кварцевым метасоматитам месторождения Южная линза, отличаясь содержанием алмандина (рис. 3.3.6). В ряде случаев для них характерны крупные хрусталевидные кристаллы кварца, порфиробластические изометричные зерна граната с гелицитовыми структурами и идиоморфные мелкозернистые кристаллы кианита.



Рис. 3.3.4 – метасоматическая зональность кианит-кварцевой фации по субстрату амфиболитов. Амфиболит \rightarrow Grt-Am-Pl-Ky-Qtz \rightarrow Grt-Ky-Qtz.



Рис. 3.3.5 – метасоматическая зональность кианит-кварцевой фации по субстрату гранат-биотитовых гнейсов. Grt-Bt гнейс \rightarrow Grt-Bt(Ms)-Ky-Qtz.



Рис. 3.3.6. Grt-Ky-Qtz метасоматит с содержанием кианита 35% и слабой мусковитовой минерализацией.

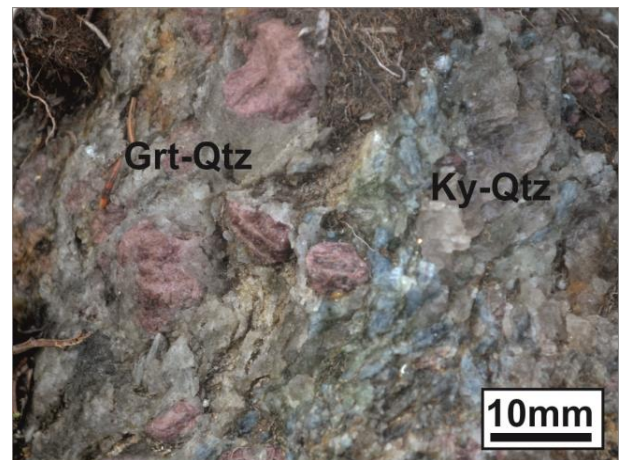


Рис. 3.3.7. Grt-Ky-Qtz метасоматит с чередующейся гранатовой и кианитовой минерализацией

Температуры и давления формирования таких пород отвечают амфиболитовой фации. Как правило, продукты кислотного метасоматоза кианит-кварцевой фации сочетаются с основными метасоматитами St-Grt, Pl-St-Grt, Am-St-Grt состава. В результате фиксируется появление пяти- и шестиминеральных ассоциаций, отвечающих в ряде случаев составам

хизоварита. Самым важным следствием является совместное существование в породах различных природных типов граната. Основной метасоматоз ставролит-гранатовой фации характеризуется формированием высокоглиноземистых и железистых пород St-Ky-Grt-Qtz состава. Важным следствием является формирование граната пироп-альмандинового состава и ставролита. Гранат проявлен в виде хорошо ограненных порфиробластов (диаметром до 3 см.), наблюдаются скелетные и полнокристаллические формы. Ставролит проявляется в виде линз диаметром до 20 см (рис. 3.3.8). внутренние зоны преимущественно гранат-ставролитового состава наблюдаются редко, чаще всего проявлены наложенные на кислотные метасоматиты продукты основного метасоматоза и отдельные линзовидные образования ставролитового или гранатового состава, но границы промежуточных метасоматических зон прослеживаются достаточно четко (рис. 3.3.9).

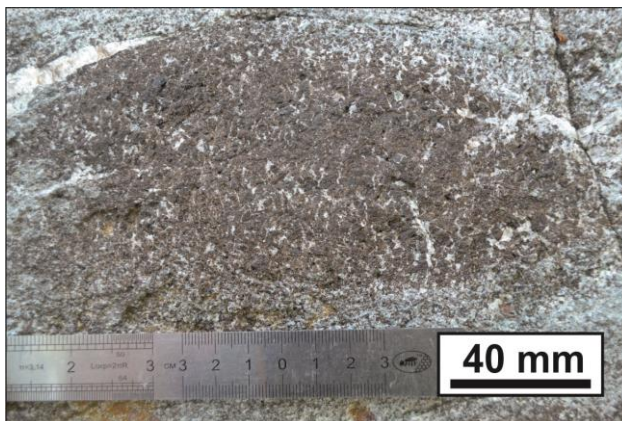


Рис. 3.3.8. Ставролитовая линза в Ky-Qtz-Ms метасоматите, характеризующая наложение продуктов основного метасоматоза ставролит-гранатовой фации на продукты кислотного выщелачивания.

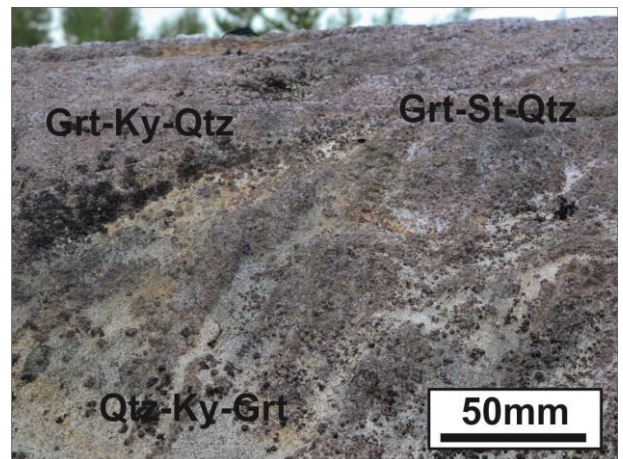


Рис. 3.3.9. Переход от Qtz-Ky-Grt метасоматических ассоциаций к Grt-Ky-Qtz и Grt-St-Qtz в результате наложения продуктов основного метасоматоза ставролит-гранатовой фации на продукты кислотного выщелачивания.

В реальности часто наблюдаются процессы мусковитизации метасоматитов. В результате процесса формируются различные варианты мусковит-ставролит-кианит-гранат-кварцевых метасоматитов, представляющие

большой интерес как комплексные руды (рис. 3.3.10). Мусковитизация связана с низкотемпературными метасоматическими процессами мусковит-кварцевой фации кислотного выщелачивания (с формированием мусковит-кварцевых парагенезисов). В результате наложения данного процесса на биотитсодержащие породы формируются следующие ассоциации: Grt-Bt-Pl-Qtz (гранат-биотитовые гнейсы)→Grt-Ms-Pl-Qtz (гранат-мусковитовые гнейсы), Grt-Ky-Bt-Qtz→Grt-Ky-Ms-Qtz (одни из наиболее часто встречающихся метасоматитов месторождения). Мусковитизация накладывается в том числе на продукты основного метасоматоза, являясь самым поздним метасоматическим процессом в пределах месторождения (Послемигматитовый метасоматоз, 1983) (рис. 3.3.11). Мусковитизация часто связана с хорошо проницаемыми для растворов зонами тектонического расланцевания и милонитизации (рис. 3.3.12-3.3.13).



Рис. 3.3.10. Продукты кислотного метасоматоза кyanит-кварцевой и мусковит-кварцевой фаций. Qtz линза характеризует поздние гидротермальные процессы.

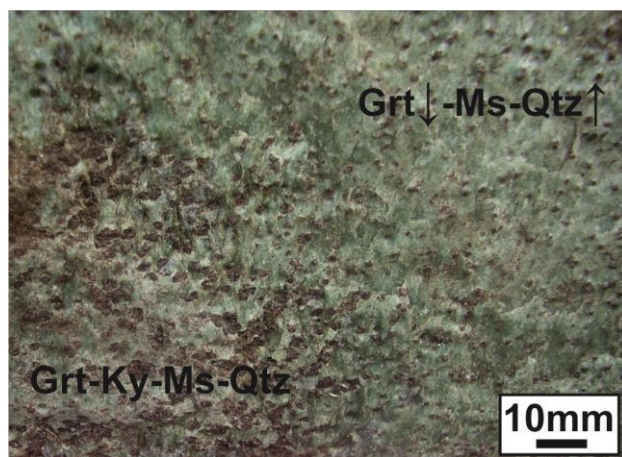
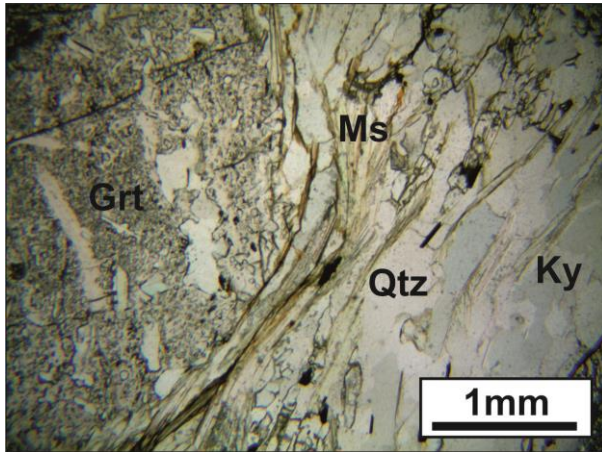
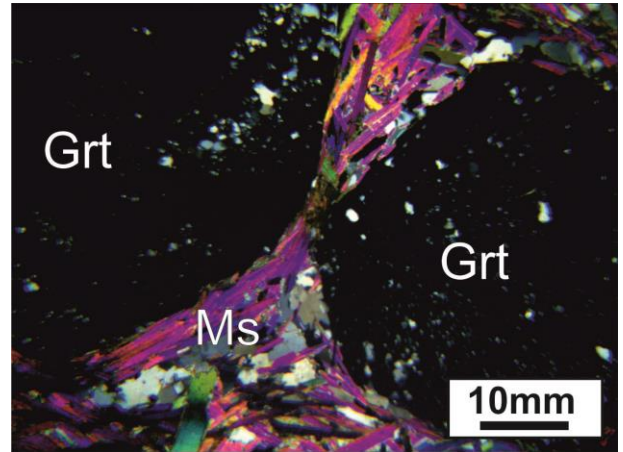


Рис. 3.3.11. Мусковитизация метасоматитов Ky-Qtz состава и продуктов метасоматоза ставролит-гранатовой фации часто приводит к формированию пород, аналогичных декоративным сланцам участка «Фукситовый».



3.3.12. Мусковитизация внешней зоны кислотного метасоматоза по Grt-Bt гнейсу (Grt-Bt-Ky-Qtz состав). Видны реликтовые зерна биотита. || николи.



3.3.13. Мусковитизация внутренней зоны кислотного метасоматоза по Grt-Bt гнейсу (Grt-Qtz состав). X николи.

При геологической съемке целесообразно описывать породы субстрата и развитые по ним варианты метасоматических зон в порядке: внешние→промежуточные→внутренние зоны.

- **Гранат-биотитовые гнейсы** (Grt-Bt-Pl-Qtz) развиты в центральной части структуры, но занимают малую площадь. Фактически, можно считать их реликтовыми породами, не подвергшимся или в малой степени подвергшимся метасоматическим процессам. Структура пород лепидогранобластовая, текстура полосчатая. По Grt-Bt гнейсам развивается ряд метасоматитов. Ниже приведены описания метасоматических зон с постепенным изменением химического и минерального состава пород. Химический состав пород меняется в сторону большей глиноземистости и появлению кианита во внутренних зонах (инертность Al_2O_3 при подвижности K_2O , Na_2O , CaO , MgO , FeO , Fe_2O_3) и кремнеземистости (инертность SiO_2 при подвижности K_2O , Na_2O , CaO , MgO , FeO , Fe_2O_3 , Al_2O_3), что отмечалось и для пород месторождения «Хизоваара» [Послемигматитовый метасоматоз, 1983]. Минеральный состав иллюстрирует увеличение количества минеральных фаз во внешней зоне метасоматитов по сравнению с породой субстрата.

Петрографический состав метасоматических зон:

0. Grt+Bt+Pl+Qtz (неизмененные породы субстрата)
1. Grt+St+Bt+Ky+Ms+Pl+Qtz (внешняя зона, наблюдается чередование St и Bt полос в гнейсе).
2. Grt+St+Bt+Ms+Ky+Qtz; (отсутствует плагиоклаз)
4. Grt+St+Ms+Ky+Qtz; Grt+Bt+Ms+Ky+Qtz
5. Grt+Ms+Ky+Qtz;
6. Grt+Ky+Qtz; Grt+Ms+Qtz
7. Grt+Qtz

- *Амфибол-биотитовые, амфиболовые гнейсы* (Bt -Am-Pl-Qtz) встречаются в северо-западной и западной частях структуры. Средние составы этих пород варьируют, но в большинстве случаев они отвечают составу андезита-андезибазальта. Структура пород лепидогранобластовая и гранолепидобластовая в зависимости от содержания биотита. Текстура полосчатая, на некоторых участках сланцеватая. Метасоматические зоны для амфибол-биотитовых гнейсов, петрографическое описание которых приведено ниже, содержат продукты как кислотного, так и основного метасоматоза, состав промежуточных зон при этом наиболее полно соответствует составам хизовааритов.

Описание метасоматических зон:

0. Grt+Am+Bt+Pl+Qtz (неизмененные породы субстрата)
1. Grt+St+Am+Bt+Ms+Pl+Qtz
2. Grt+St+Bt+Ms+Pl+Qtz (чередование St и Bt полос в гнейсе)
3. Ky+Grt+Bt+Ms+Qtz (Ky, как правило, в малых количествах)

4. Grt+Ms+Ky+Qtz (содержание кианита возрастает)

5. Grt+Ms+Qtz

6. Ms+Qtz

- **Амфиболиты** представлены двумя хорошо различимыми разновидностями: гранатовыми и безгранатовыми. Амфиболиты безгранатовые встречаются в самой северной части структуры, весьма схожи с метагаббро, поэтому велика вероятность, что изначально породы связаны с силлом габбро. Не принимают участия в строении оруденелых участков. Встречаются также амфиболиты с незначительным количеством (<5%) граната. Расположены они в северной и северо-восточной частях структуры. Данные породы не имеют большого распространения в площади съемки месторождения, их наличие в обрамлении рудной линзы определяют границы площади подсчета ресурсов. В пределах месторождения значение имеют гранатсодержащие амфиболиты (Grt-Qtz-Pl-Am) распространенные в центральной, северной и южной частях структуры. Гранат в породах крупный, преимущественно альмандинового состава, его формирование связано как с метаморфизмом амфиболитовой фации и кислотным метасоматозом кианит-кварцевой фации. В пользу этого говорят данные геологической съемки, фиксирующие повышение содержания граната в породе по мере приближения к центральной части структуры, а также приуроченность гранатовых порфиробластов к тектонически ослабленным зонам (содержание граната может достигать 25%). Количественная минералогическая оценка фиксирует содержание граната в метаморфическом субстрате амфиболитового состава в среднем 7%.

Описание метасоматических зон:

0. Grt+Qtz+Pl+Am (неизмененные Grt амфиболиты)

1. St+Grt+Qtz+Am+Pl

2. St+Grt+Ky+Pl+Qtz

3. St+Ky+Grt+Qtz (обособление ассоциаций Grt+Ky+St в кварците)

4. Grt+Ky+Qtz

5. Grt+Qtz

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 определяется 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 (фото 3.3.14)



Фото 3.3.14. Grt-Ms-Qtz метасоматит

Среди всех метасоматических пород выделяется несколько наиболее представительных разновидностей, описание и минеральный состав которых приводится ниже. Следует отметить, что данные породы могут объединять ряд последовательных метасоматических зон или внутренние метасоматические зоны по разным типам субстрата.

- **Гранат-амфибол-биотитовые и гранатсодержащие амфибол-кианит-биотитовые сланцы и гнейсы** преимущественно Grt-Bt-(Ky)-Am-Pl-Qtz состава с крупными, порфиробластическими гранатом и плагиоклазом, иногда встречаются крупные пойкилокристаллы ставролита с включениями кварцевого состава. В некоторых случаях наблюдается замещение ставролита кианитом при переходе из одной метасоматической зоны в другую. Формирование данных пород связано с полиэтапным метасоматозом кислотной кианит-кварцевой фации и основной ставролит-гранатовой фации. Породы наблюдаются в западной части структуры и представлены вытянутыми субшироко телами.

- **Ставролит-гранат-кианит-биотит-мусковит-кварцевые метасоматиты.** Породы, которые можно отнести к метасоматитам по субстрату амфибол-биотитовых и гранат-биотитовых гнейсов. В пользу этого говорят геологические наблюдения, которые фиксируют зональность Bt-Am-Pl-Qtz (Амфибол-биотитовые гнейсы) → Grt-Bt-Pl-Am-Qtz → St-Grt-Bt-Pl-Qtz → Ky-Grt-Bt-Qtz, при этом в большинстве случаев наблюдается мусковитизация пород, в результате они приобретают состав, включающий пятиминеральную ассоциацию St-Grt-Ky-Ms-Qtz. Породы подобного состава формируются по субстрату гранат-биотитовых гнейсов, но в них не проявлен амфибол во внешних зонах. Зональность для них выглядит следующим образом: Grt-Bt-Pl-Qtz → St-Grt-Bt-Pl-Qtz → St-Grt-Bt-Qtz → Grt-Ky-Qtz. Они занимают восточную, центральную и южную части структуры. Процессы мусковитизации в них проявлены повсеместно. Таким образом, по субстрату двух пород формируется самая представительная толща рудовмещающих метасоматитов,

часть которых (включая амфибол) отвечает составу хизоварита. Породы, описанные в данном абзаце, как и почти все метасоматиты структуры, также несут признаки поэтапного метасоматоза, сперва кислотного кианит-кварцевой и мусковит-кварцевой фаций, затем основного ставролит-гранатовой фации.

- *Гранат-кварц-мусковитовые метасоматиты.* Породы, развиты в юго-восточной части структуры представляют собой внутренние зоны кислотного метасоматоза кианит-кварцевой фации и мусковит-кварцевой фации. Как все другие метасоматиты месторождения, содержат гранат, что является их отличием от мусковит-кварцевых метасоматитов месторождения «Восточная Хизоваара», хотя этапы их формирования схожи. Иногда содержат кианит в небольших (до 5%) количествах, отражающий состав предыдущей метасоматической зоны. В пределах месторождения проявлены локальные тела метасоматитов и гидротермальных жил, имеющие небольшой размер. Они представлены телами амфибол-кианитовых основных метасоматитов по субстрату амфиболитов [Проскурин, 2014], линзами и жильными образованиями гранатитов, кварцевыми жилами и прожилками. Наибольший интерес представляют гранатиты, проявленные в виде анхимономинеральных гранатовых пород, формирование которых связано с сопряженным с кислотным метасоматозом процессом переотложения (железо-магнезиальный метасоматоз [Бушмин, 1978]). Чаще всего гранатиты развиты в пределах тектонических несогласий, литологических границ (особенно часто при на контакте с амфиболитами). Форма выделения – линзы максимальным диаметром до первых метров и прожилки мощностью до метра. Порфиробластические гранатиты наблюдаются в виде линз среди кварцевых метасоматитов внутренних зон кислотного выщелачивания (рис. 3.3.15). Чаще всего подобные образования приурочены к хорошо проницаемым деформационным контактам между амфиболитами и гнейсами (рис. 3.3.16). На таких контактах они проявлены в виде отдельных линейных зон и прожилков.

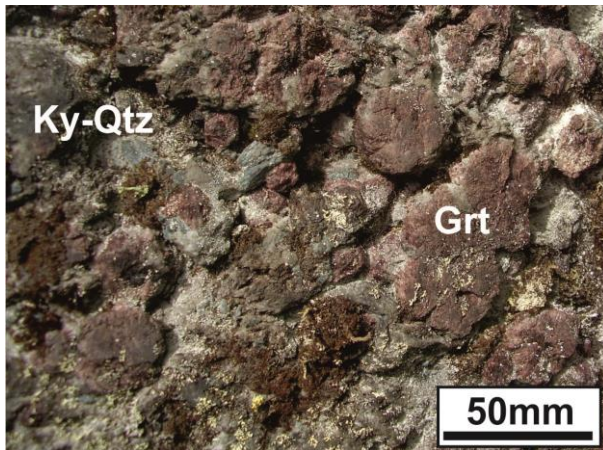


Рис. 3.3.15. Гранатит линзовидно-порфиробластический в толще метасоматитов Qtz-Ky состава.

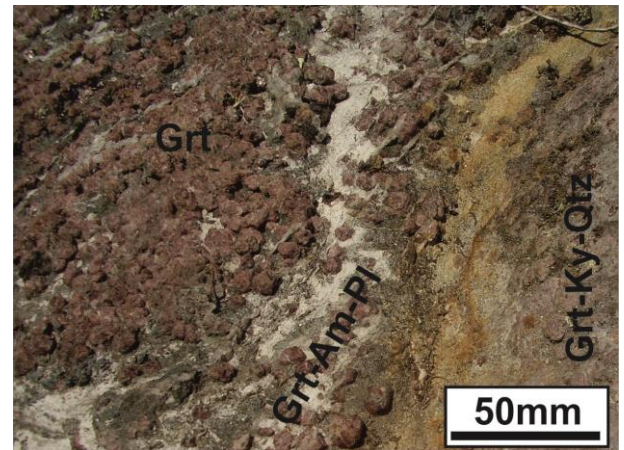


Рис. 3.3.16. Гранатит на контакте амфиболитов и гранат-биотитовых гнейсов. Породы субстрата метасоматически измененные.

Петрохимические исследования подтверждают важность метасоматических процессов при формировании рудовмещающих пород. В таблице 3.3.2 и на рис. 3.3.17 отражены химические составы пород и тренды их изменения в метасоматитах.

Таблица 3.3.2. Химический состав (оксиды) основных пород месторождения.

Название	Тип пород	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма
A-4-a-3	Амфиболит	57,19	0,86	17,38	2,31	10,24	0,2	4,06	4,29	0,48	1,37	98,38
642-3	Амфиболит	52,06	1,36	14,73	3,4	11,23	0,28	5,62	7,08	2,13	0,44	98,33
645-3	Гранат-биотитовый гнейс	69,88	0,41	14,99	1,21	4,36	0,04	1,35	2,68	3,05	1,3	99,27
В-III	Гранат-биотитовый гнейс	58,12	1,05	20	0,88	7,3	0,091	2,43	4,03	4,19	0,76	98,85
В-II	Метасоматит по амфиболиту	51,94	0,83	16,22	2,18	10,77	0,126	1,39	9,14	1,39	0,48	94,47
A-5-3	Метасоматит по гранат-биотитовым гнейсам	58,83	1,03	20,91	2,97	10,06	0,11	2,44	1,32	0	1,23	98,9
V13-24-6-3	кианит-гранат-слюдистый	68,41	0,6	16,84	0,78	9,27	0,19	1,07	1,41	0,01	0,97	99,55

	метасоматит											
V13-11-4-3	кианит-гранат- слюдистый метасоматит	68,3	0,6	16,77	0,99	9,12	0,19	1,06	1,41	0,01	0,96	99,41
A-3-2-3	кианит-гранат- слюдистый метасоматит	69,83	0,91	16,58	0,13	9,03	0,14	1,44	1,36	0	0,41	99,83
A-3-3-3	гранат- кианитовый метасоматит	50,89	0,69	16,59	4,53	20,43	0,26	2,67	3,68	0	0,12	99,86
A-7-3	метасоматит по амфибол- биотитовым гнейсам	67,96	0,61	18,97	1,11	4,52	0,04	0,66	2,67	0,75	1,4	98,69
1B-57-3	метасоматит	62,92	1,17	18,94	1,23	6,81	0,1	0,8	0,9	0,36	3,97	97,2
1B-46-3	метасоматит	66,76	0,6	18,73	1,75	6,49	0,1	0,94	2,06	0,1	1,44	98,97
1B-34-3	метасоматит	75,1	0,5	14,91	0,73	4,22	0,1	0,95	0,89	0	1,78	99,18
1B-17-3	метасоматит	69,08	0,49	13,66	1,12	6,02	0,06	2,41	1,84	0,46	2,77	97,91
B-I	кианит-гранат- слюдистый метасоматит	66,24	0,62	19,49	0,96	5,6	0,151	1,11	3,82	0,57	0,1	98,661
B-IV	кианит-гранат- слюдистый метасоматит	70,7	0,88	16,45	1,54	7,47	0,131	0,6	0,5	0,17	0,62	99,061
B-VIII	кианит-гранат- слюдистый метасоматит	66,6	1,13	20,72	0,8	3,16	0,059	0,95	4,39	0,9	0,61	99,319
13-2001	кианит-гранат- слюдистый метасоматит	66,02	0,92	16,7	10,57	0	0,136	1,66	2,45	0,6	0,43	99,486
14-2001	кианит-гранат- слюдистый метасоматит	67,42	1,16	19,16	1,01	6,03	0,11	0,83	2,16	0,83	0,43	99,14
B-VI	ставролит- кианит- гранатовый метасоматит	68,59	0,69	19,18	0,87	4,38	0,12	0,68	2,88	0,68	0,7	98,77
B-VII	ставролит- кианит- гранатовый метасоматит	73,03	0,67	17,63	0,52	3,59	0,08	0,58	2,23	0,58	0,41	99,32
B-IX	ставролит- кианит-	63,34	1,04	18,7	1,63	11,63	0,167	0,23	1,22	0,23	0,11	98,297

	гранатовый метасоматит											
B-V	гранатит	58,43	0,6	15,07	1,18	17,02	0,49	0,47	3,38	0,47	0,16	97,27

Изучение петрохимии пород проводилось путем сравнения составов на диаграммах ACF ($Al_2O_3+Fe_2O_3-CaO-FeO+MgO+MnO$) и АКF ($Al_2O_3+Fe_2O_3-K_2O+Na_2O-FeO+MgO+MnO$), отражающих соотношения малоподвижных ионов Al^{3+} и Fe^{3+} , железо-магнезиальной компоненты и щелочей (CaO в случае диаграммы ACF). Результаты показывают, что в процессе кислотного метасоматоза резко падает содержание щелочных металлов и достигает минимума в кианит-гранат-кварцевых метасоматитах, которые характеризуют промежуточные зоны кислотного метасоматоза по гнейсам. 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.

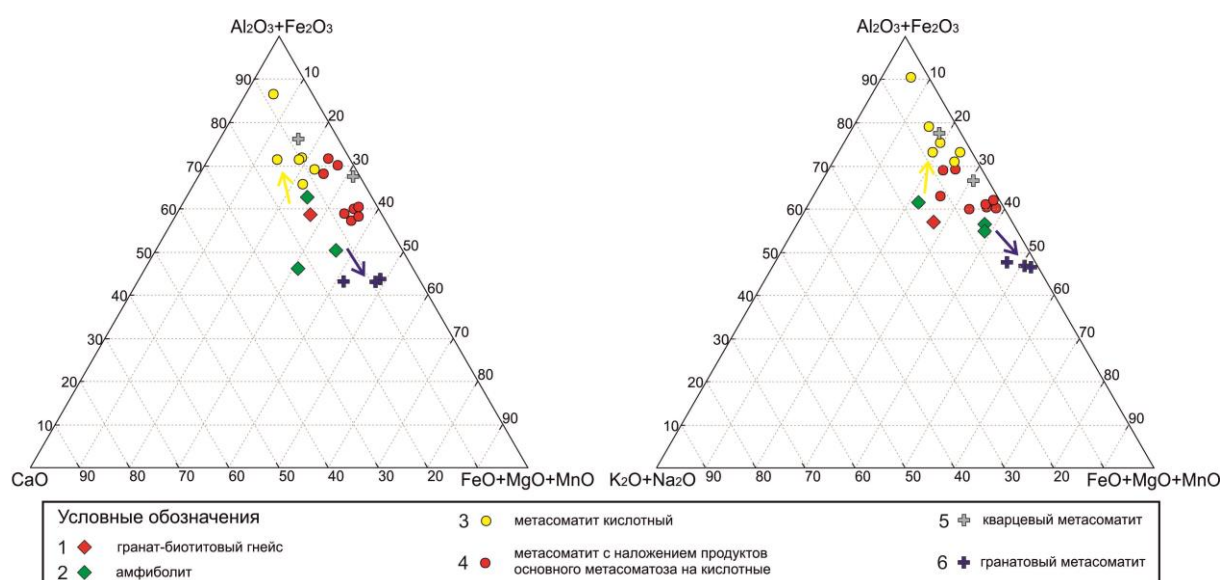


Рис. 3.3.17. Диаграммы ACF ($Al_2O_3+Fe_2O_3-CaO-FeO+MgO+MnO$) и АКF ($Al_2O_3+Fe_2O_3-K_2O+Na_2O-FeO+MgO+MnO$) для химических составов пород месторождения.

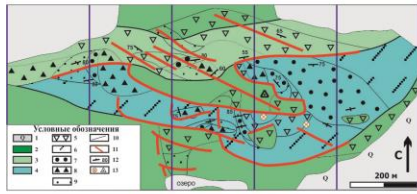
Наибольшее значение имеют распространенные в центре структуры гранат-биотитовые гнейсы и связанные с ними метасоматиты. С ними связано комплексное оруденение центральной линзы месторождения. Гранат-биотитовые гнейсы практически не представлены в виде метаморфического субстрата из-за развития процессов метасоматоза различных фаций. Амфиболовые и амфибол-биотитовые гнейсы наблюдаются в неизменном виде в северной части структуры. Амфиболиты проявляют высокую устойчивость к метасоматическому выщелачиванию, поэтому чаще представлены в виде субстрата или внешних зон. Характерными особенностями процессов метасоматоза являются: наличие реликтовых участков пород, метасоматическая зональность, при которой от наиболее измененных, внутренних зон к слабоизмененным внешним наблюдаются закономерности, характеризующие метасоматические процессы, пересечения метасоматическими зонами структур и литологических границ. Метасоматические процессы имеют малый масштаб, но высокую интенсивность, поэтому метасоматическую зональность можно проследить в пределах отдельных обнаженных участков.

Деформации горных пород

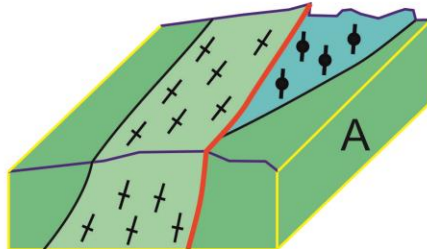
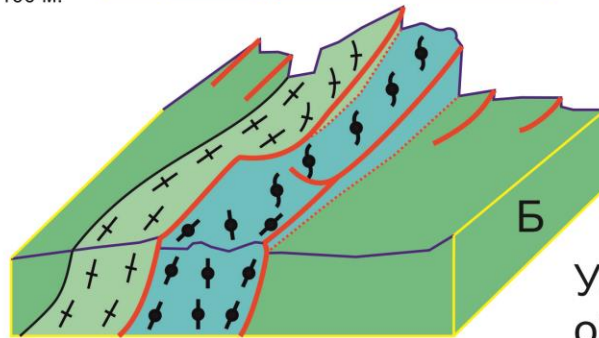
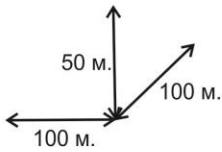
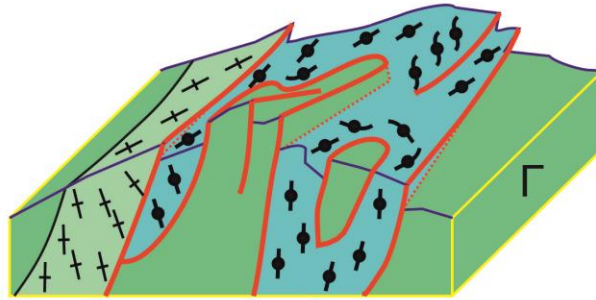
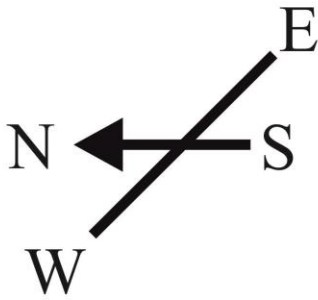
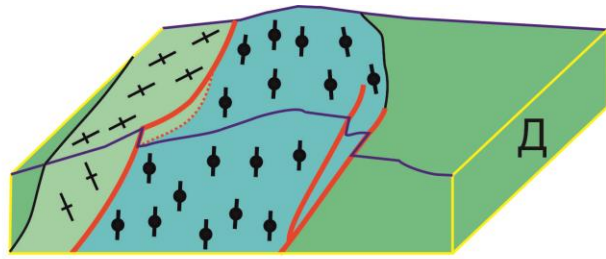
Хизоваарская структура и месторождение «Высота-181» по геологическим условиям расположено в пределах иерархической зоны сдвига (shear zone), приуроченной к области сочленения Карельского кратона и Беломорского подвижного пояса [Колодяжный, 2004]. Структуры разной иерархии различаются при структурном 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 линейно затухающего простого сдвига (некоаксиальное течение пород). Особенности строения участка месторождения соответствуют модели сдвигового дуплекса сжатия (транспрессивная ассоциация [Woodcock, Fisher, 1986]). Главным результатом

развития транспрессии является блоковое поднятие центральной части структуры месторождения, сложенной гранат-биотитовыми гнейсами и амфиболитами. Слагающий господствующую высоту выход гранат-биотитовых гнейсов в плане имеет линзовидную форму, осложненную блоком амфиболитовых пород в центре. Контакты между гранат-биотитовыми гнейсами и амфибол-биотитовыми гнейсами разрывные. Сдвиговые деформации развиты по азимуту $80-100^\circ$, в плане сдвиг по контактам рудной линзы характеризуется как правый. Блок-диаграмма месторождения представлена на рис. 3.3.18. По ней можно судить о том, что месторождение сформировано рядом вертикальных транспрессивных дислокаций, при общем субвертикальном и крутопадающем залегании пород, что соответствует представлениям о ассиметричном строении Хизоваарской структуры, при котором южное крыло залегает более круто по сравнению с северным [Кожевников, 2000]. Время главных дислокаций соответствует позднему свекофеннскому метаморфизму, во время которого хрупко-пластичные деформации сменялись хрупкими. Об этом говорит ориентировка минералов, кристаллизующихся в стрессовых условиях. Наиболее широко распространено интенсивное синметаморфическое рассланцевание пород вблизи сместителей и общая ориентировка сланцеватости, субпараллельная или даже строго совпадающая с зеркалами скольжения и разрывными деформациями (рис. 3.3.19). Еще одним фактом, подтверждающим синметаморфический характер разрывных деформаций является постепенное изменение направления сланцеватости пород в центре линзы (пластичные деформации), на определенном этапе переходящее в хрупко-пластичные и хрупкие деформации с образованием эшелонированных кулисообразных структур (рис. 3.3.20). В пределах месторождения проявлены также поздние хрупкие деформации, пересекающие линейность, сланцеватость пород и метасоматические зоны. Отсутствие ориентировки минералов, сопряженных с деформациями, говорит об их дизъюнктивном характере (рис. 3.3.21). К поздним хрупким деформациям относятся также плоскопараллельные трещины отрыва (рис. 3.3.22).

Блок-диаграмма



А Б В Г Д



Условные обозначения






-  1
-  2
-  3
-  4
-  5

Рис. 3.3.18. 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.

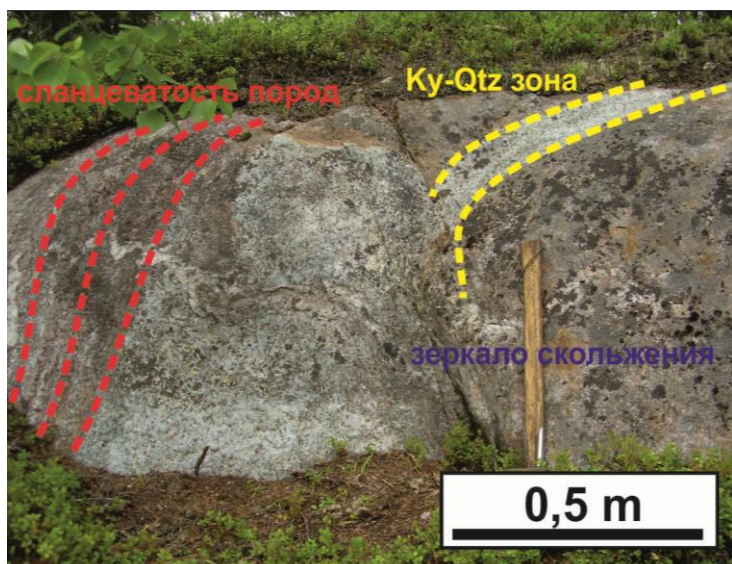


Рис. 3.3.19. Сланцеватость, отражающая формирование пород в стрессовых условиях, метасоматические зоны плоскостного типа, формирующиеся по хорошо проницаемым рассланцованным участкам, и зеркала скольжения разрывных деформаций. Все элементы параллельны.

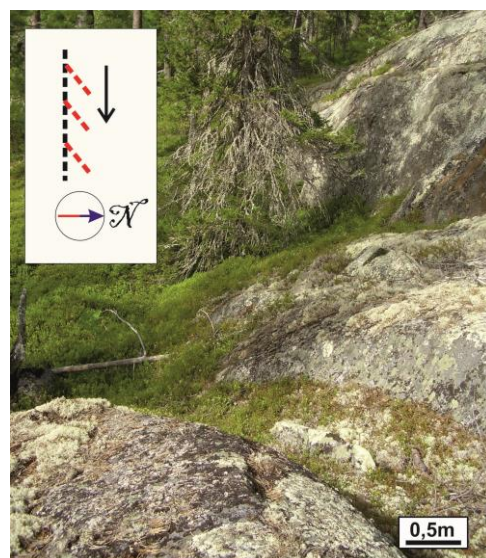


Рис. 3.3.20. Кулисообразные структуры. Стрелкой показано направление генерального сдвига, красными пунктирами – ориентировка кулис. Хорошо различимы зеркала сланцеватости, параллельные разрывным деформациям.

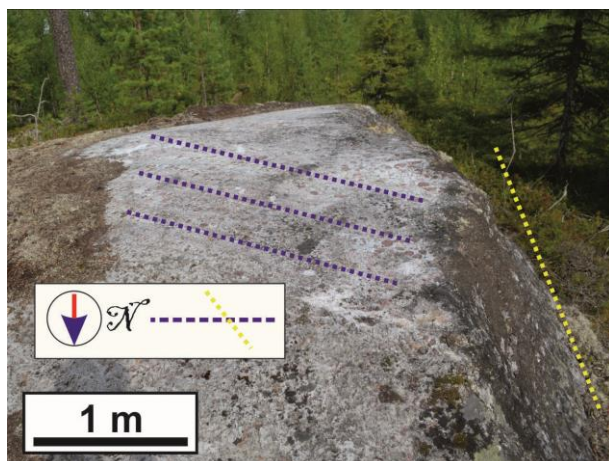


Рис. 3.3.21. Разрывное нарушение пересекает сланцеватость Qtz-Ky-Grt-St-Ms метасоматита.

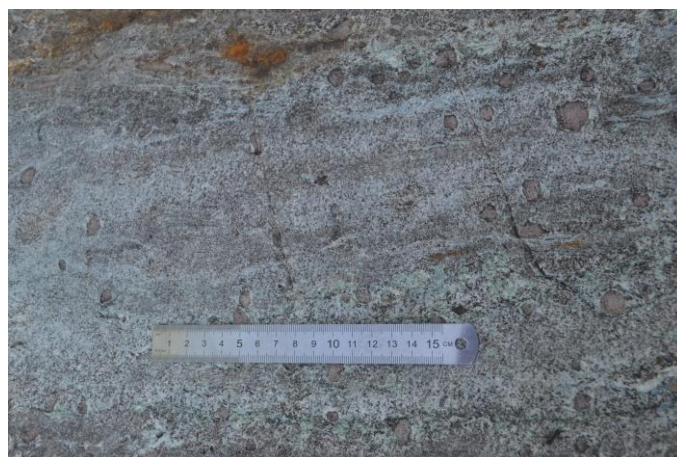


Рис. 3.3.22. Трещины отрыва.

3.4. Корреляция состава вмещающих пород с базальтами и андезибазальтами осадочно-вулканогенной СТА

Для определения стратиграфического положения рудовмещающих пород было проведено сопоставление их химической специализации с метаморфическими породами хорошо изученных месторождений Северного фланга Хизоваарской структуры: «Хизоваара» и «Межозерное» по данным [Щипцов, 1983, Кожевников, 2000, Родионов, 2001].

Месторождение «Хизоваара» («Южная», «Восточная» и «Северная» Линзы).

«Северная» и «Восточная» линзы месторождения кианитовых руд «Хизоваара», приурочены к рудным телам неправильной линзовидной формы метаморфогенного генезиса по породам кор выветривания или продуктам эффузивной деятельности, представленными лавами андезитов с повышенным содержанием глинозема. Наиболее продуктивной является «Южная» линза месторождения, представляющая собой мощное оруденелое тело, в пределах которого выделяется шесть залежей кианитовых руд метаморфогенно-метасоматического и метасоматического генезиса по протолиту граувакки андезитового состава [Щипцов, 1988]. Кианитовое оруденение представлено тремя типами кианита – метаморфического, метаморфогенно-метасоматического и метасоматического генезиса, различающегося по кристалломорфологии, химическому составу, содержанию в оруденелых породах [Щипцов, 1988; Минерально сырьевая база..., 2006].

Месторождение «Межозерное».

Продуктивная толща залегает среди пород хизоваарской свиты неоархея. Пространственное положение толщи структурно связано с контактом амфиболитов (и их метасоматически измененных разновидностей, в частности, гранат-кианитовых амфиболитов) и гнейсов амфибол-биотитового и биотитового состава [Родионов, 2001; Минерально сырьевая база..., 2006].

Месторождение было оценено на маложелезистый мелкочешуйчатый мусковит. В процессе изучения структурно-текстурных и минералогических особенностей, выделены несколько природных типов пород, отличающихся, в первую очередь по содержанию мусковита: от слабомусковитизированных (2-3% мусковита) до мусковитовых кварцитов (20-35% мусковита). Технологическая схема комплексного обогащения, разработанная на 102 рядовых и 2 укрупненных пробах [Мусковитовые кварциты Карелии – новый..., 2003], включает гравитационное разделение на концентрационном столе с получением мусковитового, кианитового, кварцевого концентратов [Скамницкая и др, 2012] и доводку их классификацией в соответствии с требованиями стандартов. Дальнейшее обогащение кварцевого продукта позволяет получать концентрат высокого качества, пригодный для производства металлического кремния и ферросилиция [Данилевская, Скамницкая, 2012]. Метасоматическое выщелачивание мусковит-кварцевой фации приурочено к зонам рассланцевания и часто накладывается на продукты метасоматоза кианит-кварцевой фации. Для данного механизма в пределах Хизоваарской структуры отмечено замещение биотита мусковитом в условиях выноса из системы MgO и FeO [Глебовицкий, Бушмин, 1983]. Таким образом, парагенезисы, включающие мусковит в пределах месторождения (Grt+Bt+Ms+Qtz+Pl, Grt+Ky+Ms+Bt+Qtz, Bt+Ms+Qtz, Pl+Ms+Qtz), принадлежат в том числе к слабо измененным метасоматозом породам (биотитовым и амфибол-биотитовым гнейсам).

Для сопоставления оруденелых пород и метасоматитов были проанализированы составы проб, отобранных из метаморфических пород на месторождениях Хизоваарской структуры. Состав пород месторождений по данным источников и авторской работы приведен на бинарной диаграмме TAS ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$) и диаграмме AFM ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}-\text{MgO}$); рис 3.4.1-2. Результаты исследования показывают, что составы метаморфических пород месторождения «Высота-181» коррелируют с составами metabазитов и

амфиболовых гнейсов андезитового ряда, описанными для Хизоваарской структуры.

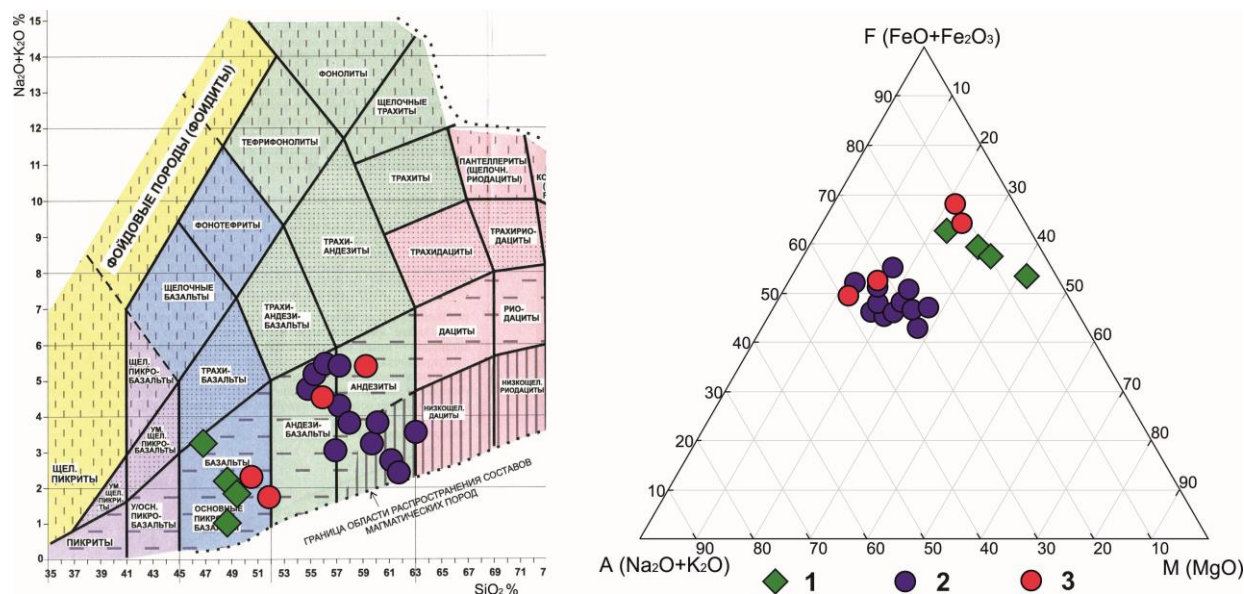


Рис. 3.4.1-2. Составы метаморфических пород Хизоваарского рудного поля на классификационных диаграммах TAS и AFM: 1 - базальты, амфиболиты месторождения «Хизоваара», 2 – андезиты, амфибол-биотитовые гнейсы месторождений «Хизоваара» и «Межозерное» [Щипцов, 1983, Кожевников, 2000, Родионов, 2001]. 3 – амфиболиты и гнейсы месторождения «Высота-181»

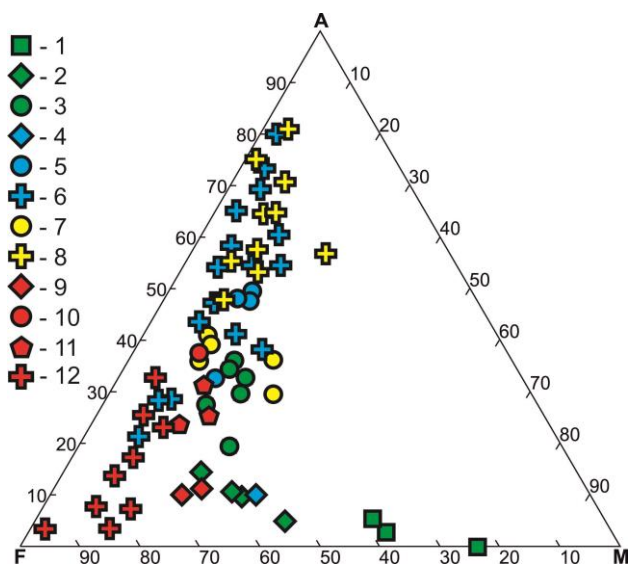


Рис. 3.4.3. Составы метаморфических и метасоматических пород Хизоваарского рудного поля на классификационной диаграмме AFM. 1 – коматииты, 2 - базальты, 3 – андезиты; [Кожевников, 2000]. 4 – амфиболиты месторождения «Южная Линза», 5 – амфибол-биотитовые гнейсы месторождения «Южная Линза»; 6 – кианитсодержащие метасоматиты месторождения «Южная Линза»; [Щипцов, 1983]. 7 – амфибол-биотитовые гнейсы месторождения «Межозерное», 8 – мусковитсодержащие метасоматиты месторождения «Межозерное»; [Родионов, 2001]. 9 – амфиболиты месторождения «Высота-181», 10 – амфибол-биотитовые гнейсы месторождения «Высота-181», 11 – гранат-биотитовые гнейсы месторождения «Высота-181», 12 – гранатсодержащие метасоматиты месторождения «Высота-181».

Для анализа метасоматических изменений на диаграмме АФМ были отражены составы метаморфических и метасоматических пород месторождений Северного и Южного фланга Хизоваарской структуры (рис. 3.4.3). Наблюдаются два различных механизма метасоматоза: дебазификация пород Северного фланга, связанная с уменьшением FeO, MgO и базификация в породах Южного фланга, выраженная минералогически в высоком содержании граната и ставролита.

Наблюдаются общие черты в локализации руд для всех объектов Хизоваарского рудного поля. В таблице 3.4.1 иллюстрируется ряд сходств и различий в строении и характере оруденения на месторождениях Северного и Южного флангов. К сходствам относится развитие оруденения по протолиту преимущественно осадочно-вулканогенных пород андезитового состава и строение месторождений – линзовидные зональные образования (зональность связана с метасоматической колонкой, линзовидность – со структурным характером контроля метасоматических зон). Различия проистекают из особенностей геологического строения. Однородные рудные тела месторождений «Южная линза» и «Межозерное» имеют мощность и протяженность первые сотни метров. Главная рудная залежь месторождения «Высота-181» имеет протяженность более 800 м, но оруденение в ее пределах крайне неоднородно. Это связано с высокой сложностью геологического строения, в условиях, когда зоны метасоматических изменений приурочены к контактам между породами.

Таблица 3.4.1. Сравнительная характеристика оруденелых пород месторождений Хизоваарской структуры.

Размеры рудных тел	Характер оруденения
Северный фланг структуры	
Месторождение «Южная Линза»	
	Оруденение в виде зональных и линзовидных субпараллельных кварц-кинитовых, кианит-кварцевых метасоматизированных пород в пределах мощной толщи с наложенной сульфидной и графитовой минерализацией. Характер оруденения и интенсивность метасоматических процессов может незначительно меняться в разных линзах. Оруденение в линзах и зонах однородное на протяжении 50 и более метров и в большинстве наблюдаемых обнажений контролируется контактами слюдястых гнейсов и метабазитов.
Месторождение «Межозерное»	
	Оруденение однородное на протяжении 100-200 м. в линзах и контролируется контактами слюдястых гнейсов и метабазитов. Линзовидные тела представлены мусковитовыми кварцитами, в пределах которых встречаются локальные тела кинитовых метасоматитов. В зоне контакта с базитами развиты гранат-мусковитовые, гранат-кианитовые метасоматиты.
Южный фланг структуры	
Месторождение «Высота-181»	
	Оруденение однородное (соответствует составу одного из типов руды) на протяжении 10-30 м. в метасоматических зонах и контролируется контактами гранат-биотитовых гнейсов, амфибол-биотитовых гнейсов и амфиболитов. Минеральный состав зон меняется в широких пределах на малой площади. Описаны три природных типа руд – гранатовые, гранат-ставролит-кианитовые и гранат-мусковитовые.

Выводы:

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, старовлита и мусковита.

Глава 4. Факторы контроля комплексных гранатовых руд

Рудоконтролирующие факторы определяют закономерности условий формирования и локализации оруденения в пределах рудных районов и месторождений. Базовый метод анализа металлогенических факторов для средне- и крупномасштабных металлогенических исследований заключался в специальном изучении рудоконтролирующих факторов в условиях рудного района определенного типа и в анализе этих данных на обзорной, собственно металлогенической и прогнозной картах с учетом перспектив проявлений всех возможных типов оруденения [Шаталов и другие, 1963]. Таким образом, все рудоконтролирующие факторы классифицируются по характеру геологических процессов: разрывные, складчатые, вулканические, магматические, стратиграфические и/или литологические, метаморфические и другие. Для металлических и неметаллических ПИ в современном минерагеническом анализе факторы контроля чаще разделяются не только по типу, но и масштабу процессов [Тогизов, 2018]. Они могут контролировать рудные районы, рудные поля, рудные тела и т.д. Существует также подход к подразделению рудоконтролирующих факторов на рудообразующие, рудораспределяющие и рудолокализирующие [Огородников, 2014]. В данной работе, в силу локальности исследования (работа касается конкретного месторождения, а не рудного поля, узла или формационной зоны), классификация факторов контроля руд приводится в классическом виде по характеру геологического процесса. Вместе с тем в описании каждого фактора будет приведена краткая характеристика (если она определена и важна в данном случае), является фактор рудообразующим (определяет первопричину формирования руд), рудораспределяющим (определяет размещение минерализации в определенных границах) или рудолокализирующим (определяет мощность и форму рудных тел и толщ).

Месторождение «Высота-181» относится к серии метаморфогенных (классу метаморфических), сформированных в условиях амфиболитовой фации.

Для выявления роли рудоконтролирующих факторов были составлены карты распределения промышленных минералов. На существующую топографическую основу наносились точки наблюдения, привязывались данные по петрографическому составу, результаты минералогических анализов МТП и данные с привязанных площадок статистики. 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 4.1.1-4.1.4). На карты распределения были нанесены три типа субстрата и главные деформации. На основании этих построений и результатов, отраженных в 3 главе данной работы, 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 включают в себя региональный метаморфизм и связанные с ним процессы метасоматоза, критически важные для формирования руд месторождения.

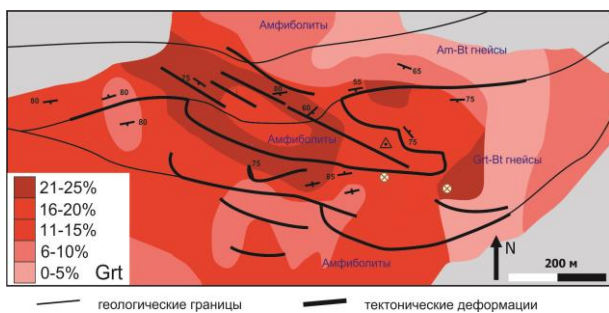


Рис. 4.1.1. Распределение гранатового оруденения.

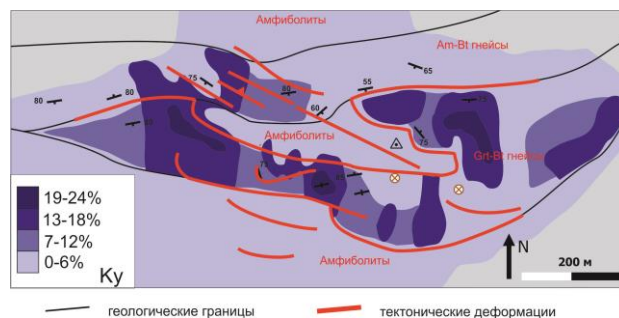


Рис. 4.1.2. Распределение кианитового оруденения.

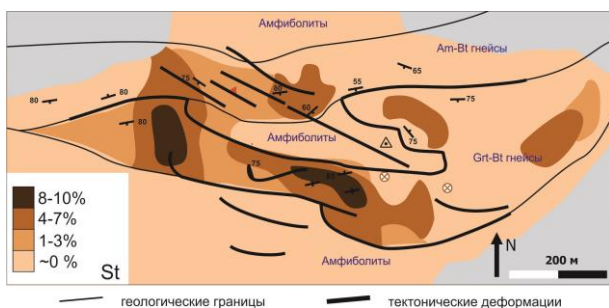


Рис. 4.1.3. Распределение ставролитового оруденения.

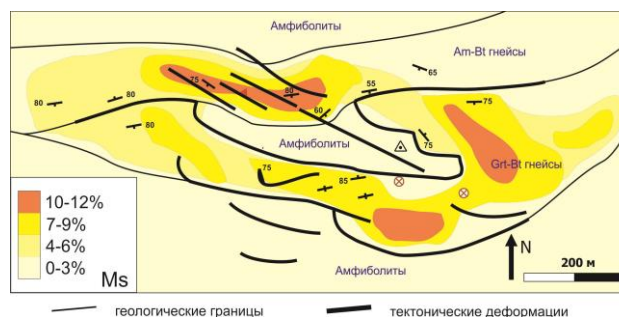


Рис. 4.1.4. Распределение мусковитового оруденения.

4.1. Литологические (литолого-стратиграфические) факторы.

Месторождение гранатовых руд «Высота-181» приурочено к Южному флангу Хизоваарской структуры, для которого исследователями в разные годы выделялись все главные характерные для северного фланга породы, но в значительно меньших масштабах [Кожевников и др., 2000, Слабунов, 2005, Проскурин, 2014], что связано с асимметрией складчатой структуры. В главах 2 и 3 подробно рассмотрен вопрос связи всех месторождений Хизоваарского рудного поля с осадочно-вулканогенной СТА. 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. Данные факторы 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. Данные о вмещающих руды породах используются при первичном картировании и геометризации рудных залежей, выявлении закономерностей оруденения. Для исследуемого участка в силу активных метасоматических процессов характер вмещающих пород не всегда коррелирует с конкретными типами руд.

4.1.1. Пространственная связь с толщами амфибол-биотитовых гнейсов.

Амфибол-биотитовыми гнейсами в работе называется ряд пород с преимущественным содержанием Am, Bt и Pl ($n > 70$) и гнейсовидной структурой. Толща данных пород занимает западную и северо-западную часть структуры, субвертикально выделяясь в виде пласта на дневную поверхность с шириной выхода 100-120 м. В первичном составе амфибол-биотитовых гнейсов гранат проявлен слабо (~1 %), таким образом пространственная связь с амфибол-биотитовыми гнейсами является рудоконтролирующим фактором для граната метасоматической генерации, который, как будет зафиксировано в дальнейшем, является наиболее однородным и свободным от включений. Проницаемость пород для гидротермально-метасоматических растворов высокая, поэтому по субстрату амфибол-биотитовых гнейсов формируются комплексные руды, содержащие четырех- и пятиминеральные рудные вещественные парагенезы (мусковит не является равновесным минералом и проявлен как результат наложенных низкотемпературных процессов)

4.1.2. Пространственная связь с толщами гранатовых амфиболитов.

Безгранатовые амфиболиты развиты широко в пределах Хизоваарской структуры. Обычно они описываются как глубоко метаморфизованные

базальты и субвулканические породы, слагающие значительную часть ТГЗО. В пределах месторождения выделяются гранатосодержащие амфиболиты, особенно высоки содержания граната на контактах амфиболитов с другими породами и в тектонически ослабленных метасоматизированных зонах, что может говорить о появлении граната как о признаке метасоматических преобразований на фоне аллохимического свекофеннского метаморфизма. Метасоматиты, имеющие в качестве исходного субстрата амфиболиты, встречаются редко и невелики по занимаемой площади. Всего можно выделить три характерные области распространения амфиболитов:

– северная часть месторождения, где по обнажениям прослеживается переход от амфибол-биотитовых гнейсов к безгранатовым амфиболитам, которые не изучались подробно из-за низкой обнаженности, но, судя по структурным данным, являются более молодыми, чем амфиболиты центральной или южной частей. Выходят за площадь подсчета содержания граната.

- южная часть месторождения, где четко выявлены контакты, осложненные разрывными нарушениями между гранат-биотитовыми гнейсами и гранатовыми, метасоматизированными амфиболитами. К югу содержание граната падает и в 200 м. от контакта фиксируются безгранатовые амфиболиты. Граница площади подсчета проходит по цепи озер, перекрывающих постепенный переход от гранатовых амфиболитов к безгранатовым

- центральная часть месторождения, где выделено крупное тело гранатовых амфиболитов и ряд более мелких тел аналогичного состава. Данные тела частично ограничены разрывными нарушениями и геологически не связаны напрямую с амфиболитами обрамления. Подобное коллажирование, при котором химически разные породы наблюдаются в виде переслаивающихся линз и слоев, характерно для осадочно-вулканогенной СТА (Кожевников, 2000).

Пространственная связь с амфиболитами является рудоконтролирующим фактором для граната метаморфической генерации и промышленных минералов из незначительных по площади амфиболсодержащих метасоматитов.

4.1.3. Пространственная связь с толщами гранат-биотитовых гнейсов.

Гранат-биотитовые гнейсы являются основной рудовмещающей и наиболее метасоматически измененной породой. Занимают центральную часть 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-Vt 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.

4.2. Структурные факторы

К структурным рудоконтролирующим факторам на месторождении относится деформационный режим локализации руд. Целесообразно рассматривать деформационные режимы как дорудные, синрудные и пострудные [Кулаковский, 2005], так как синхронные со Свекофеннским этапом метаморфизма сдвиговые деформации (синрудные) и более поздние (пострудные) четко разделяются на основании структурного анализа.

Среди дорудных структурных факторов контроля локализации месторождений часто рассматриваются глобальные системы структурно-разрывных нарушений, контролирующих более поздние. Применительно к ТГЗО таким фактором могут считаться системы глубинных разломов, определяющих архейский вулканизм. Вмещающие породы являются индикатором геодинамической обстановки формирования руд, и рассмотрение их в контексте изучения структурного контроля является логичным для формационного анализа более крупных структур. Для рассматриваемых в работе факторов контроля важным является структурный фактор, связанный с субмеридианальными зонами деформаций, развитыми по толщам осадочно-вулканогенных пород (подробно данный вопрос рассмотрен в п. 3.3, 3.4).

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 в структурно-кинематических парагенезах. Пострудные структурные факторы, связанные с хрупкими деформациями, относятся к рудолокализирующим, отвечая за границы рудной минерализации и мощность рудных тел.

4.2.1. 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. Примеры метасоматитов подробно описаны в главе 4.3. и в главах, посвященных природным разновидностям и типам руд. Для зоны сдвиговых деформаций характерно формирование структурных парагенезов, которые являются совокупностью всех структурных

форм, сформировавшихся в едином генеральном поле напряжений [Милеев, 1978]. Структурные парагенезы могут повторяться в разных масштабах в пределах единой тектонической зоны и имеют ряд особенностей: 1). Структурные парагенезы более низкого порядка (по сравнению с главной зоной сжатия и следующей из него транспрессии) могут иметь отличные сдвиговые направления. 2). Синхронность тектонических процессов с метаморфизмом и метасоматозом определяет появление различных структурно-вещественных парагенезов, причины формирования которых могут быть описаны только при помощи рядовых структурно-кинематических рисунков. Характерные примеры структурно-вещественных парагенезов приведены на рис. 4.3.1-4.3.4. На рис. 4.3.1. проиллюстрированы сколы Риделя – серии диагональных к плоскости сдвига трещин, относящихся к этапу хрупких и хрупко-пластичных деформаций на низкотемпературном этапе регрессивного метаморфизма. Самые поздние трещины заполняются кварцем гидротермального генезиса, хотя существуют трещины, последовательно заполненные гранатом и кальцитом (сбросовые процессы). Рис. 4.3.2. иллюстрирует развитие милонитов с сохранением в кварцевом агрегате единичных кристаллов граната. Окружающие породы полиминеральные. В пределах месторождения развиты различные варианты милонитов, преимущественно кварц-мусковитовые и кварцевые, изредка кианит-кварцевые. Рис. 4.3.3. иллюстрирует порфиробластез с вращением минерального обособления (граната) в процессе прогрессивных деформаций с формированием минеральной оторочки. В аспекте контроля руд данный процесс интересен формированием крупных гранатовых порфиробластов с обрамлением из кварца и мусковита в гранат-биотит-кианитовых гнейсах. Чаще всего минеральная оторочка сформирована из слюдистых минералов, при этом мусковит и биотит могут присутствовать одновременно. Всегда прослеживается связь расланцевания с метасоматозом. На рис. 4.3.4. показаны линейные зоны гранат-мусковит-кварцевого состава, параллельные сланцеватости мусковит-кварцевого кианит- и гранатсодержащего метасоматита.



Рис. 4.3.1. Сколы Риделя, заполненные кварцевым веществом гидротермального генезиса.

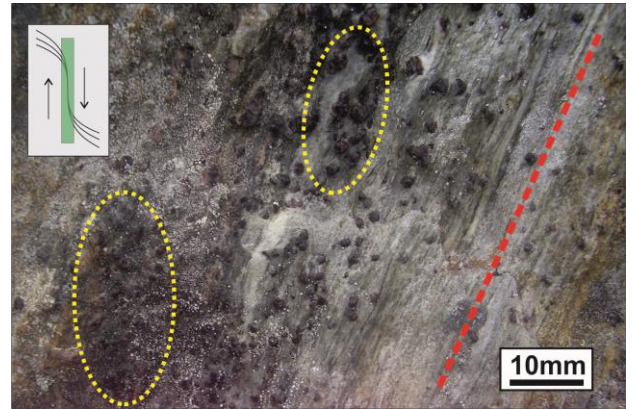


Рис. 4.3.2. Милонитизация (красный пунктир), контролирующая кварцевый агрегат. В милонитах более низкого порядка развиты гранатовые порфиробласты в кварците, далее гранатовые прослои.

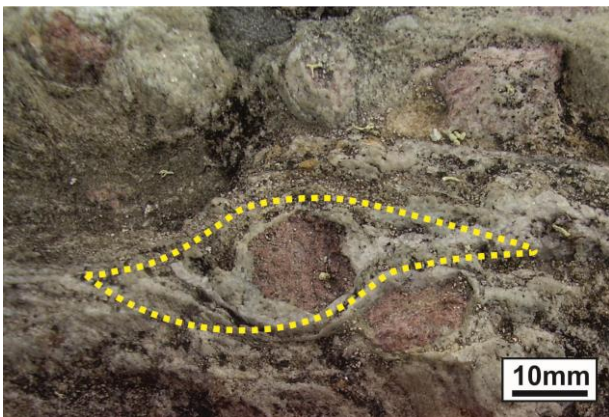


Рис. 4.3.3. Порфиробласт граната в минеральной оторочке кварц-мусковитового состава (окаймлены желтым пунктиром)



Рис. 4.3.4. зона линейного развития порфиробластов граната в кyanит-биотит-гранат-кварцевом метасоматите.

Зоны рассланцевания определяют формы и размеры рудных тел. Существует также прямая связь между минеральным составом этих зон с проблемами технологической минералогии комплексных руд. Данный вопрос кратко рассмотрен в 6 главе.

4.2.2. Пострудный деформационный режим

Не участвуя в формировании оруденелых пород, хрупкие деформации отвечают за локализацию рудных тел. Чаще всего проявлены горсто-грабеновые структуры, с превышениями до 10 м., которые являются характерными для обстановок сжатия (рис. 4.3.5). Кроме того, плоскопараллельные системы трещин часто вмещают гидротермальные кварцевые жилы (рис. 4.3.6). Признаком пострудных деформаций является их разрывная природы, без проявления вязких дислокаций. Трещины и сместители пересекают сланцеватость и линейность пород, ориентировки минералов, формирование которых подчиняется стрессовым режимам метаморфизма Свекофеннского этапа.



Рис. 4.3.5. Эшелонированные кулисообразные горсто-грабеновые структуры, ограниченные разрывными нарушениями.



Рис. 4.3.6. Кварцевая жила, секущая сланцеватость пород.

4.3. Метаморфогенно-метасоматические факторы

Метаморфогенно-метасоматические факторы контроля руд связаны с региональным метаморфизмом Свекофеннского этапа и синхронными процессами метасоматоза. Подробное описание петрологических процессов, на базе рассмотрения которых описаны факторы контроля, приведено в главе 3.3.

4.3.1. Региональный метаморфизм.

Из двух выявленных этапов метаморфизма наиболее важным представляется Свекофеннский, так как с ним связано формирование неметаллических ПИ, рассматриваемых в данной работе и являющихся породообразующими минералами. По этому признаку месторождение можно отнести к классу метаморфических метаморфогенной серии. К промышленным минералам, сформировавшимся в результате свекофенского метаморфизма, относится гранат 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. На фоне метаморфизма проявлены деформации и процессы метасоматоза, поэтому можно отнести данный рудоконтролирующий фактор к глобальным, 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%).

4.3.2. Кислотный метасоматоз кианит-кварцевой фации

Проявлен в гнейсах и является главным механизмом, приводящим к Ku оруденению пород месторождения. Наиболее очевидным признаком метасоматического процесса кианит-кварцевой фации является

метасоматическая зональность, при которой минералы метаморфических пород (Am, Vt, 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.

4.3.3. 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-Vt-Qtz метасоматитах (внешних зонах метасоматоза по субстрату Grt-Vt гнейсов) окаймлены мусковитом. Анхимономинеральные мусковитовые породы развиты в зонах милонитизации с кианитом и кварцем, содержание мусковита достигает 80%. Процесс замещения биотита мусковитом происходит в метаморфических Grt-Vt гнейсах без явных признаков метасоматоза.

4.3.4. Основной метасоматоз ставролит-гранатовой фации

Продукты основного метасоматоза хорошо различимы и распространены в пределах всех метасоматитов 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.

4.3.5. Fe-Mg метасоматоз, сопряженный с кислотным выщелачиванием (процесс переотложения).

Данный процесс 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.

Таблица 4.4.1. 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 Ам 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.	++	-	-	-	В соответствии с картой (метаморфические комплексы)

(прослеживается для оруденения в породах субстрата).					
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 рассланцевания
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 4.4.1. демонстрирует 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 формируется в ассоциациях, что позволяет говорить о существовании комплексных руд.

Этапы формирования руд сведены в таблицу 4.4.2., информация о возрасте процессов основана на литературных источниках, при общем согласии практически всех авторов о полихронности метасоматических процессов [Бушмин, 1978, Послемигматитовый метасоматоз, 1983, Кианитовое поле, 1988, Проскурин, 2013].

Таблица 4.4.2. Этапы формирования руд.

Возраст U-Pb	Этап	Рудная специализация
2873+/-36 (Проскурин, 2013)	-Формирование осадочно-вулканогенных пород базальтового андезибазальтового и состава	-Первичный состав пород не ясен.
2778+/-21 (Бибикова и др., 2003); 2776+/-15 (Проскурин, 2013),	-Метаморфизм лопийского возраста, формирование амфиболитов, амфибол-биотитовых гнейсов, гранат-биотитовых гнейсов.	-Grt метаморфических пород
	Метаморфизм свекофеннского этапа, на его фоне происходят синхронные процессы метасоматического изменения пород и хрупко-пластичных деформаций.	Grt метаморфических пород
1876±21 млн. лет (Проскурин, 2013)	Кислотный метасоматоз Ky-Qtz фации и процессы переотложения.	Grt, Ky
1800±7 млн. лет (Сергеев, Лобач-Жученко, 1993),	Возраст пиковых процессов метаморфизма	
1769±23 млн. лет (Проскурин, 2013)	Основной метасоматоз St-Grt фации.	Grt, St
	Метаморфизм позднего свекофеннского этапа с происходящим синхронно процессом кислотного метасоматоза Ms-Qtz фации.	Ms, Ky

Выводы:

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.

Глава 5. Состав руд

5.1. Гранат и стадии его формирования

Гранат относится к группе распространенных минералов класса силикатов кубической сингонии. Гранат представлен алюминиевыми и кальциевыми разновидностями, составляющими два самостоятельных ряда изоморфизма и непрерывной смесимости. Алюминиевые гранаты (пиральспиты) – это пироп, альмандин, спессартин, кальциевые гранаты (уграндиты) – это уваровит, гроссуляр, андрадит [Бетехтин, 2008]. Гранаты в настоящее время широко применяются в абразивной (песок для резки, шкурки и точильные круги), электротехнической (ЖИГ-резонаторы в качестве ферромагнетика) и строительной (цемент и керамика) промышленности. Относительно новыми направлениями являются использование гранатовых порошков для фильтрации воды и водоструйной резки, очистки нефти. Для абразивной промышленности используются преимущественно железистые гранаты (альмандин), реже спессартин и андрадит. Главными критериями использования гранатов в абразивной промышленности являются твердость, особенности раскалываемости с высоким выходом остроугольных частиц, хорошая приклеиваемость к бумажной и полотняной основам. Для сборки Nd:YAG-лазеров создаются синтетические гранаты $Y_{2.97}Nd_{0.03}Al_5O_{12}$ состава [Geusic, J. E., 1964]. Данные системы используются во многих высокотехнологичных отраслях: военная промышленность (лазерные дальномеры и целеуказатели), обработка высокопрочных сплавов (гравировка, улучшение поверхности), создание оптических пинцетов для биологических применений. Гранат также находит применение для создания фильтровальных установок, полировки стекла, судостроительства, мытья текстиля и отделки деревянной мебели. В ювелирном деле используются прозрачные и крупные кристаллы граната, а также друзы, декоративные сростания. К драгоценным камням обычно относятся демантоиды, топазолиты, гроссуляры и реже гессониты, пиропы, родолиты, альмандины. В декоративном ремесле используются кристаллы

непрозрачного и полупрозрачного альмандина однородного или зонального строения.

Мировые ресурсы граната велики и встречаются в самых разнообразных породах, особенно гнейсах и сланцах. Гранат также встречается в контактово-метаморфических образованиях в кристаллических известняках, пегматитах, серпентинитах и гидротермальных жилах. Кроме того, рассыпной гранат присутствует во многих месторождениях тяжелого минерального песка и гравия по всему миру. Крупные месторождения граната существуют в Австралии, США, Канаде, Китае, Индии и Южной Африке, где они добываются для внешних и внутренних рынков; Месторождения в Турции разрабатываются для внутренних рынков. Дополнительные гранатовые ресурсы находятся в Чили, Чехии, Пакистане, Испании, Таиланде и Украине [Mineral commodity summaries, 2020]. В России гранатовые руды характерны для районов Кольского полуострова и Карелии. Гранатовые руды Карелии в основном сосредоточены в районе Ладожской протерозойской структуры (Кительское месторождение, проявления Озерное), Карельского кратона (проявления Высота-181 и Униярви) и Беломорского подвижного пояса (Нигозеро, Южно-Керетское, Маривараккское, Левин Бор, Энгозерское, Дядина Гора, Западная Плотина, северный берег оз. Варацкого, Слюдозеро, Удинское, Кузостровское, Слюдяной Бор, Кузостров, Кислячиха, Кужручейское, Тербеостров, Солохина Луда, Еловый Наволок, Югра-Наволок [Минерально-сырьевая база, 2006]).

Рынок граната при этом очень конкурентный, и для повышения прибыльности производство может быть ограничено только высококачественными гранатовыми рудами или наличием в них других товарных минеральных продуктов (кианит, мрамор, металлические руды, слюдяные минералы, силлиманит, ставролит или волластонит [Mineral commodity summaries, 2020]). Характеристики гранатового порошка для

различных целей (абразивы, фильтры, струйная резка), поставляемого компанией LM Mining (Jiangsu, China) представлены в таблице 6.1.1.

Таблица 5.1.1.

Цвет	Темно-красный	Твердость	8,0 по шкале Мооса
Осколки дробления	остроугольные	Удельный вес	3,9 г/см ³
SiO ₂	34-40%	Температура плавления	1300 °С
FeO	25-31%	Al ₂ O ₃	17-21%
CaO	5-10%	MnO	0-1%
MgO	5-6%	хлорит	10-15 ppm

В 2018 году лидером по добыче граната были Австралия (330 тыс. т.), ЮАР (270 тыс. т.), Индия (180 тыс. т.). Мировое производство граната оценивается в 1,1 млн. т. (на 2018 г.), что на 12% больше, чем в 2017 г. [Mineral commodity summaries, 2020]. Тройка лидеров серьезно изменилась по сравнению с 2015-2016 годами, когда ведущим производителем гранатового концентрата был Китай [Thomas, 2017]. При этом следует отметить, что многие страны (в том числе Китай) не разглашают полные данные по объемам добычи индустриальных минералов, поэтому реальное мировое производство может быть существенно выше. Рост производства гранатового концентрата оценивается как высокий, что не исключает включения и освоения новых месторождений по всему миру.

Гранаты из руд месторождения «Высота-181» характеризуются неоднородностью форм, состава и зональности. Для оценки руд важно выделить характерные типы граната, 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 исследования кристаллов граната с использованием электронной микроскопии и микрозондового анализа приведены в Приложении 1. Результаты расчета миналов (средние значения) отражены на рис. 5.1 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).

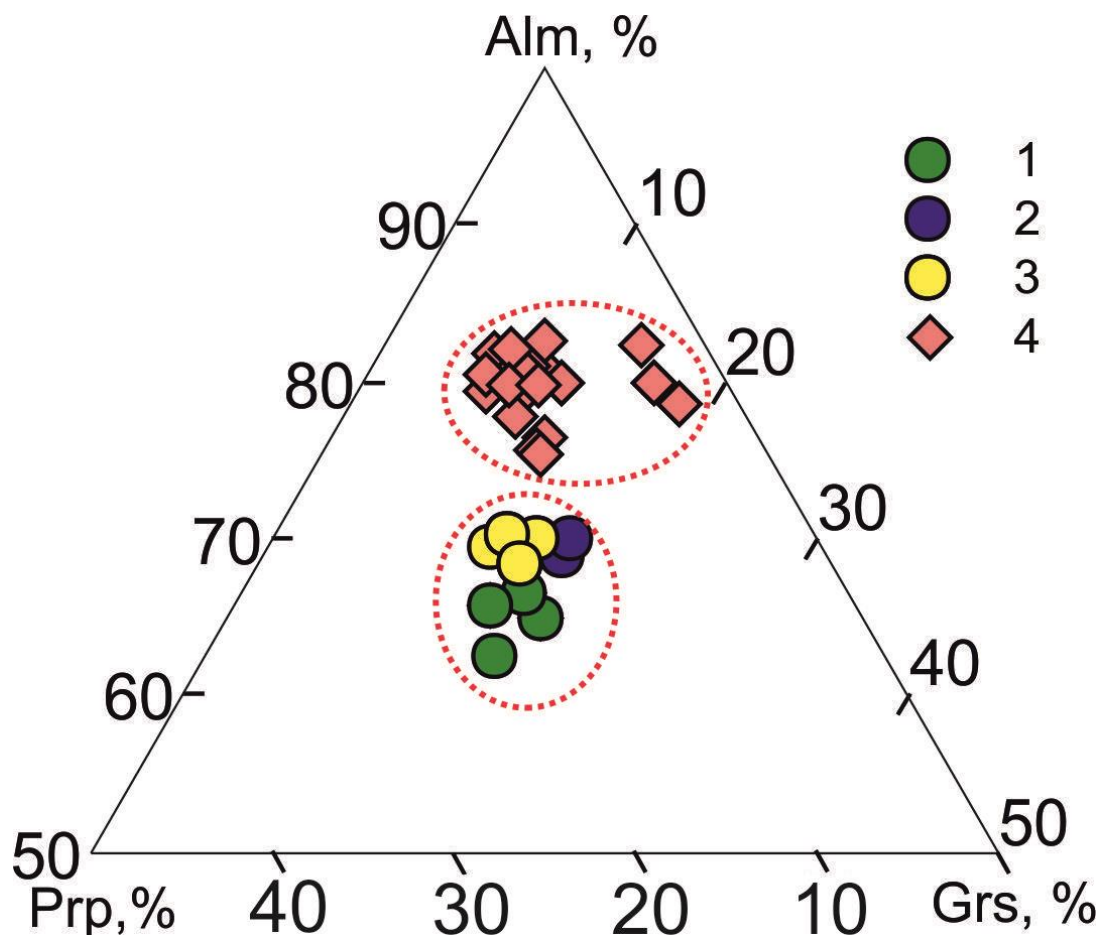


Рис. 5.1. Диаграмма альмандин-пироп-гроссуляр (Alm-Prp-Grs) для составов граната из пород месторождения.

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

Характеристика изученных кристаллов граната и их зон в разных породах представлена в таблице 5.1.2. Данная таблица отражает средние составы одинаковых зон нескольких (2-5) кристаллов граната.

Таблица 5.1.2. Сводная химическая характеристика кристаллов граната и ИХ ЗОН.

Образец	Петрографическое описание вмещающей породы	Морфологическая характеристика зерна граната	MgO	Al ₂ O ₃	Si ₂ O	CaO	MnO	FeO	Сумма
1В-18	Grt-Qtz-Bt-Ged метасоматит по амфибол-биотитовым гнейсам	кайма кристалла неправильной формы без включений	1,83	20,26	34,68	3,84	0	39,39	100
1В-33	Grt-Qtz-Pl-Ky-Ms метасоматит по Grt-Bt гнейсам	кайма однородного пойкилокристалла	3,02	20,32	35,49	4,42	0,91	35,84	100
1В-33	Grt-Qtz-Pl-Ky-Ms метасоматит по Grt-Bt гнейсам	ядро однородного пойкилокристалла	3,12	20,46	35,69	3,77	0,96	35,99	100
1В-33	Grt-Qtz-Pl-Ky-Ms метасоматит по Grt-Bt гнейсам	кайма пойкилокристалла	1,79	20,16	35,53	3,77	1,45	37,3	100
1В-48	Grt-Pl-Qtz-Am-Chl метасоматит по амфиболиту	кайма изометричного кристалла без включений	4,29	20,89	36,55	5,94	1,12	31,22	100
1В-48	Grt-Pl-Qtz-Am-Chl метасоматит по амфиболиту	ядро изометричного кристалла без включений	4,12	21,23	36,36	6,36	1,16	30,77	100
1В-48	Grt-Pl-Qtz-Am-Chl метасоматит по амфиболиту	кайма изометричного кристалла без включений	4,48	20,85	36,48	5,33	1,05	31,8	100
1В-48	Grt-Pl-Qtz-Am-Chl метасоматит по амфиболиту	ядро изометричного кристалла с включениями	4,22	21,01	36,39	6,11	1,23	31,03	100
1В-48	Grt-Pl-Qtz-Am-Chl метасоматит по амфиболиту	кайма изометричного кристалла с включениями	4,03	20,73	36,45	6,13	1,22	31,45	100
1В-48	Grt-Pl-Qtz-Am-Chl метасоматит по амфиболиту	центр изометричного кристалла с включениями	4,16	20,74	36,62	6,54	1,15	30,78	100
1В-52	Grt-Qtz-St-Ms метасоматиты по Grt-Bt гнейсам	центр идиоморфного кристалла с включениями	2,91	20,94	37,39	3,27	0,79	34,55	100
1В-52	Grt-Qtz-St-Ms метасоматиты по Grt-Bt гнейсам	кайма идиоморфного кристалла с включениями	2,93	21,26	37,4	2,72	1,11	34,57	100
1В-52	Grt-Qtz-St-Ms метасоматиты по Grt-Bt гнейсам	кайма идиоморфного кристалла с включениями	2,98	21,08	37,13	2,5	1,11	35,19	100
A4-B-1	Grt-Amph-Pl-Qtz гранатовый амфиболит с полнокристаллическим гранатом	кайма идиоморфного кристалла с включениями	4,85	21,42	37,66	5,77	0,74	29,43	100
A4-B-1	Grt-Amph-Pl-Qtz гранатовый амфиболит с полнокристаллическим гранатом	ядро идиоморфного кристалла с включениями	3,4	21,24	37,33	6,33	1,68	30,01	100
E-10-B	Grt-Bt-Ms гнейс	кайма пойкилокристалла	3,23	21,49	37,52	4,37	0,7	32,69	100
E-10-B	Grt-Bt-Ms гнейс	центр пойкилокристалла	3,46	21,73	37,38	5,36	0	32,07	100
E-19-2	Grt-Qtz метасоматит	кайма пойкилокристалла	0,77	20,52	36,4	5,5	0,59	36,21	100

	внутренней зоны по Am-Bt гнейсу								
E-19-2	Grt-Qtz метасоматит внутренней зоны по Am-Bt гнейсу	центр пойкилокристалла	0,86	20,95	36,69	5,16	0,55	35,79	100
E-19-2	Grt-Qtz метасоматит внутренней зоны по Am-Bt гнейсу	кайма пойкилокристалла	0,59	20,56	36,57	4,81	1	36,47	100
E-21	Grt-Am-Pl-Bt-Qtz-Cal неизменный Am-Bt гнейс	пойкилокристалл	3,08	21,01	37,56	6,14	0,97	31,24	100
E-21	Grt-Am-Pl-Bt-Qtz-Cal неизменный Am-Bt гнейс	пойкилокристалл	2,96	21,47	37,61	6,29	1,33	30,33	100
E-21	Grt-Am-Pl-Bt-Qtz-Cal неизменный Am-Bt гнейс	пойкилокристалл	2,97	21,23	37,36	5,91	0,84	31,69	100
E-23- F-1	Grt-Qtz-Ms-Ky-Pl-St-Chl метасоматит по Grt-Bt гнейсам	кайма изометричного кристалла без включений	3,07	21,1	37,23	3,78	0,73	34,09	100
E-23- F-1	Grt-Qtz-Ms-Ky-Pl-St-Chl метасоматит по Grt-Bt гнейсам	центр изометричного кристалла с включениями	2,69	21,36	37,61	4,1	0,67	33,57	100
E-24-1	Grt-Bt-Qtz-Ky-Pl метасоматит внешней зоны по Grt-Bt гнейсу	центр изометричного кристалла с включениями	4,49	21,2	37,28	4,75	0,51	31,78	100
E-24-1	Grt-Bt-Qtz-Ky-Pl метасоматит внешней зоны по Grt-Bt гнейсу	пойкилокристалл	4,23	21,01	37,46	4,94	0,97	31,39	100
E-24-1	Grt-Bt-Qtz-Ky-Pl метасоматит внешней зоны по Grt-Bt гнейсу	кайма неправильной формы кристалла без включений	4,1	21,39	37,2	4,66	0,94	31,71	100
E-26-3	Grt-Bt-St-Ms-Ky-Qtz-Pl метасоматит по Grt-Bt гнейсу	кайма изометричного с включениями	2,73	19,73	35,53	2,63	0,27	39,11	100
E-26-3	Grt-Bt-St-Ms-Ky-Qtz-Pl метасоматит по Grt-Bt гнейсу	центр изометричного кристалла с включениями	2,74	19,83	35,23	2,13	0,33	39,37	100
E-26-3	Grt-Bt-St-Ms-Ky-Qtz-Pl метасоматит по Grt-Bt гнейсу	кайма изометричного кристалла с включениями	2,47	20,08	35,56	3,08	0	38,81	100
E-26-3	Grt-Bt-St-Ms-Ky-Qtz-Pl метасоматит по Grt-Bt гнейсу	центр изометричного кристалла с включениями	2,28	20,32	35,27	2,91	0,61	38,61	100
E-26-3	Grt-Bt-St-Ms-Ky-Qtz-Pl метасоматит по Grt-Bt гнейсу	центр изометричного кристалла с включениями	2,39	20,26	35,31	3,22	0,85	37,97	100
E-26-3	Grt-Bt-St-Ms-Ky-Qtz-Pl метасоматит по Grt-Bt гнейсу	кайма изометричного кристалла с включениями	2,56	20,16	35,42	3,23	0	38,48	100
E-26-3	Grt-Bt-St-Ms-Ky-Qtz-Pl метасоматит по Grt-Bt гнейсу	кайма изометричного кристалла с включениями	2,66	20,07	35,86	2,95	0	38,46	100
E-26-3	Grt-Bt-St-Ms-Ky-Qtz-Pl метасоматит по Grt-Bt гнейсу	кайма изометричного кристалла с включениями	2,71	19,59	35,49	2,76	0	39,45	100
E-26-3	Grt-Bt-St-Ms-Ky-Qtz-Pl метасоматит по Grt-Bt гнейсу	центр изометричного кристалла с включениями	2,14	20,28	35,3	3,14	0,8	38,35	100
V13- 11G	Grt-Ms-Qtz-Pl метасоматит по Grt-Bt гнейсу	пойкилокристалл	3,31	21,25	37,32	4,66	0,57	32,88	100
636	Grt-Pl-Ms-Am-Ky-Qtz метасоматит по Am-Bt гнейсу	пойкилокристалл	2,9	20,69	36,93	2,98	0,82	35,68	100

На основании данных из Приложения 1 и таблицы 5.1.2. можно сделать вывод о характерных типах граната, основой классификации при этом являются

морфологические и химические особенности кристаллов, а также наличие и крупность включений. Как правило, гранаты основных продуктивных толщ представлены порфиробластами диаметром от 0,5 до 8 см, пойкилитовыми структурами, идиоморфизмом, в редких случаях мономинеральными линзами и прожилками. Включения распределены равномерно в химически однородных кристаллах.

Первый характерный тип граната (**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 (рис. 5.1.1) 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 (рис. 5.1.2 – Grt-Vt гнейс, рис. 5.1.3 – гранатовый амфиболит, обе породы без признаков метасоматических преобразований).

Химическая зональность кристаллов отличается повышением содержания MgO и уменьшением MnO и CaO от центра к кайме кристалла (табл. 5.1.1). 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-пиропы из гнейсов [Медведева, 2007].

Таблица 5.1.1. (точки спектров проиллюстрированы на рис. 5.1.4).

Спектр	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO	FeO	Сумма
Spectrum 1	5,42	21,56	37,91	5,82	0,00	29,29	100,00
Spectrum 2	5,05	21,53	37,73	5,37	0,76	29,57	100,00
Spectrum 3	4,09	21,17	37,36	6,13	1,47	29,43	100,00
Spectrum 5	3,19	21,25	37,67	6,97	1,83	29,10	100,00
Spectrum 6	3,13	21,26	37,57	6,44	1,53	30,06	100,00
Spectrum 7	3,49	21,26	37,47	6,81	1,57	29,40	100,00
Spectrum 8	3,34	21,25	37,02	6,17	1,79	30,43	100,00
Spectrum 9	3,86	21,21	36,94	5,25	1,66	31,08	100,00

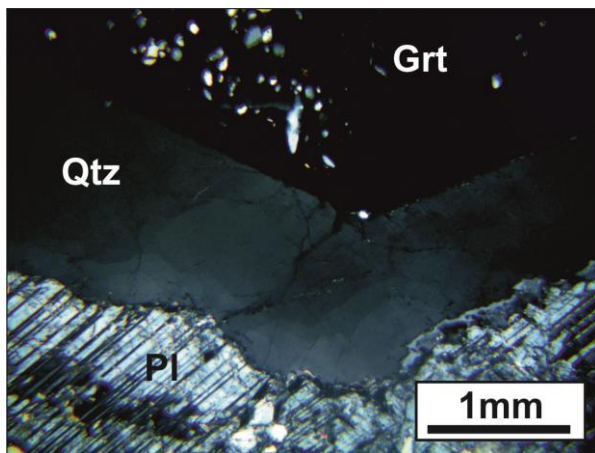


Рис. 5.1.1. Идиоморфный метаморфический гранат в Grt-Bt гнейсе.

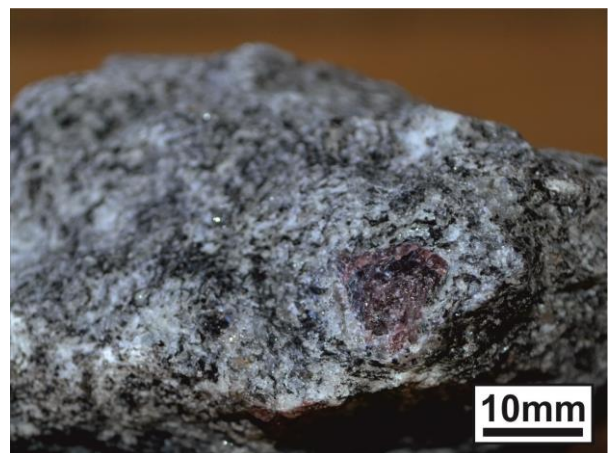


Рис. 5.1.2. Grt-Bt гнейс с порфиробластами граната ~10 мм.

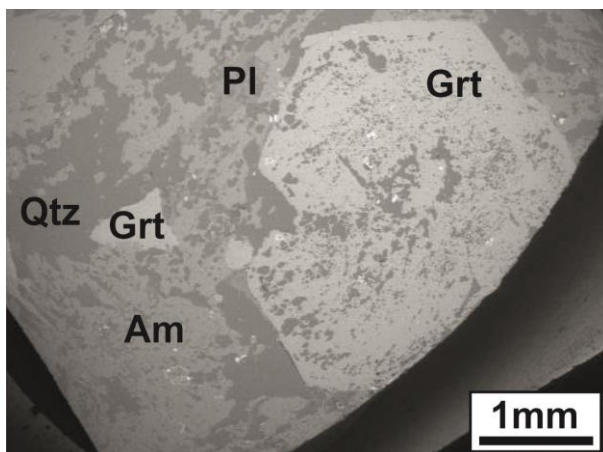


Рис. 5.1.3. Метаморфический гранат в гранатовом амфиболите

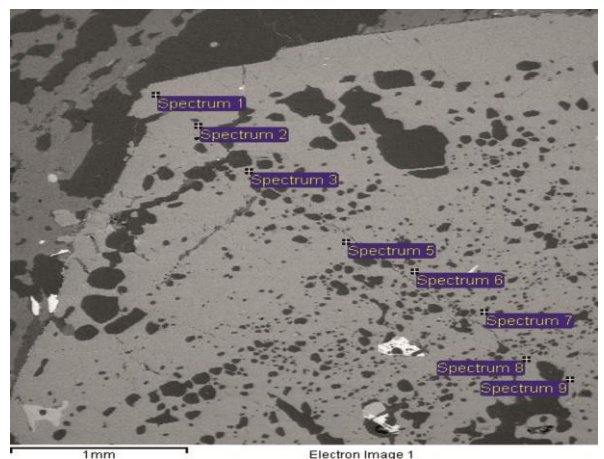


Рис. 5.1.4. Профиль изучения химической зональности (значения представлены в таблице 5.1.1). Тренд на рис. 5.1.5.

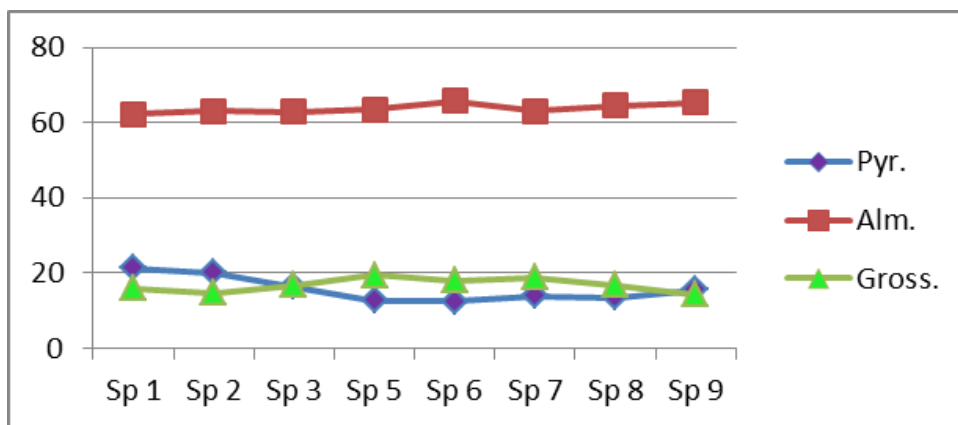


Рис. 5.1.5. Тренд изменения содержания минералов в кристалле Grt I типа (sp1 – кайма кристалла, sp9 - центр)

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 порфиробластов, 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 граната (**Grt-II**) проявлен в метасоматических зонах по разным типам субстрата. В наибольшей степени данный тип характерен для метасоматизированных амфибол-биотитовых (рис. 5.1.6-5.1.7) и гранат-биотитовых (рис. 5.1.8) 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-Bt-Pl-Qtz полосы чередуются с лейкократовыми Ky-Pl-Qtz. Также характерна ситуация, при которой зерна граната проявляют признаки катаклаза – трещиноватость и раздробленность. Развиты также идиоморфные разновидности граната с ситовидной структурой и аналогичным химическим составом (рис. 5.1.9, подробнее в Приложении 1). Гранат данного типа встречается в ассоциации с кварцем, кианитом, мусковитом. Химический состав отличается однородностью (табл. 5.1.2).

Таблица 5.1.2. (точки спектров проиллюстрированы на рис. 5.1.7).

Спектр	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO	FeO	Сумма
Spectrum 2	3,39	20,53	37,55	5,83	0,82	31,87	100,00
Spectrum 3	2,85	21,23	37,58	6,04	0,86	31,44	100,00
Spectrum 4	3,26	21,03	37,74	6,01	0,82	31,14	100,00
Spectrum 5	2,72	21,21	37,38	5,88	0,75	32,06	100,00
Spectrum 6	2,86	21,30	37,14	5,78	0,98	31,95	100,00
Spectrum 7	3,07	21,87	37,05	5,52	0,79	31,68	100,00
Spectrum 8	3,17	21,30	37,02	5,81	0,94	31,77	100,00
Spectrum 9	2,46	21,38	37,44	6,37	0,74	31,61	100,00

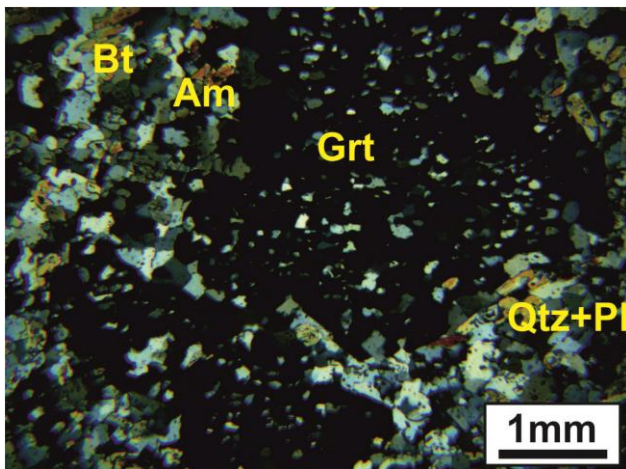


Рис. 5.1.6. Зерно граната, сформированного в результате процессов метасоматоза кианит-кварцевой фации в толще Am-Bt гнейсов. Пойкилитовые

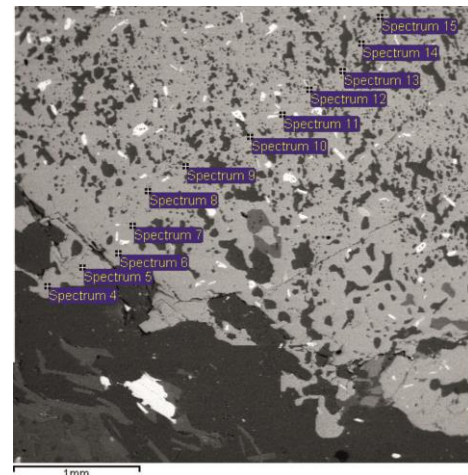


Рис. 5.1.7. Профиль изучения химической зональности (значения представлены в таблице 5.1.2.)

структуры зерна характерны для данного типа
граната.

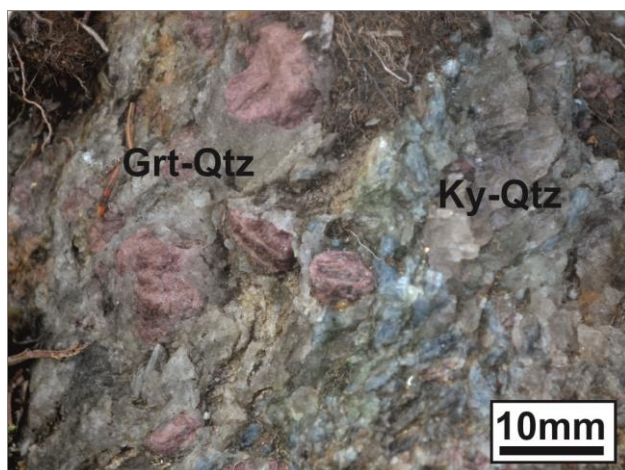


Рис. 5.1.8. кристаллы альмандина (**Grt-II**) в гранат-кианит-кварцевом метасоматите.

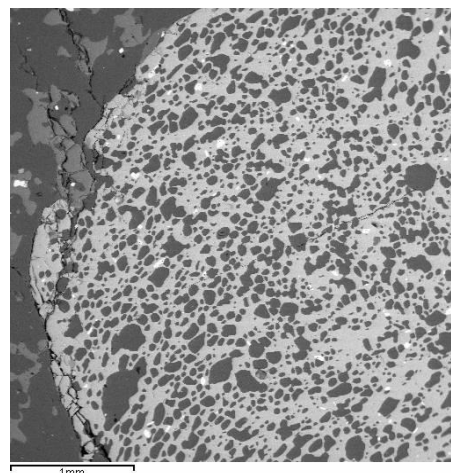


Рис. 5.1.9. Идиоморфный кристалл граната с ститовидной структурой из Grt-St-Ms-Ky гнейса (промежуточная зона метасоматоза)

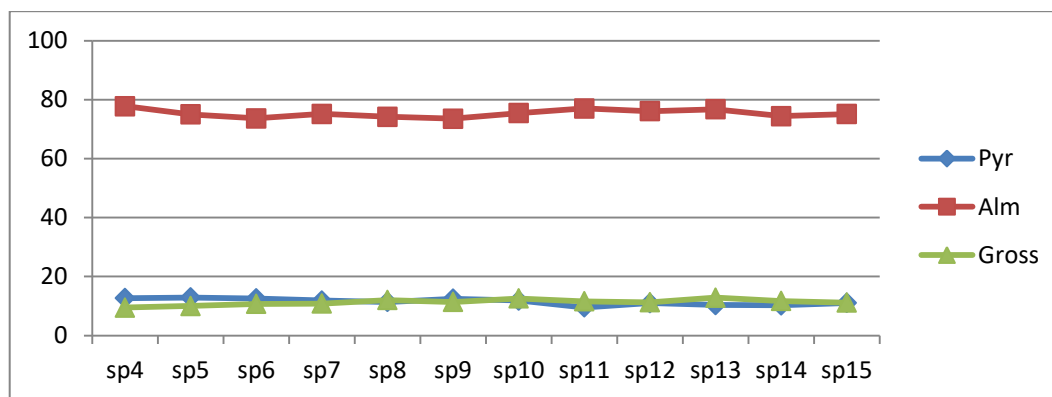


Рис. 5.1.10. Тренд изменения содержания миналов в кристалле Grt II типа (sp4 – кайма кристалла, sp15 – центр)

Третий тип граната (**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 (рис. 5.1.11). Характерны корродированные реакционные каймы, разноориентированные включения. Химический состав отличается однородностью и наиболее высоким содержанием пироба (18-22%) по сравнению с гранатами других типов (табл. 5.1.3). Содержание альмандина 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.

Таблица 5.1.3. (точки спектров проиллюстрированы на рис. 5.1.12).

Спектр	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO	Fe _n O _m	Сумма
Spectrum 1	4,26	20,60	37,04	5,66	1,19	31,25	100
Spectrum 2	4,42	20,90	36,76	5,79	1,22	30,91	100
Spectrum 3	4,19	21,22	36,33	6,23	1,21	30,82	100
Spectrum 4	4,06	20,91	36,09	6,31	1,28	31,35	100
Spectrum 5	4,86	20,63	36,26	4,93	0,97	32,35	100
Spectrum 6	4,32	21,32	36,15	5,40	1,00	31,80	100



Рис. 5.1.11. Зерна граната, сформированного в результате процессов метасоматоза ставролит-гранатовой фации в кварцевых метасоматитах внутренней зоны. Идиоморфные формы зерен практически без включений и с реакционной каймой характерны для данного типа граната.

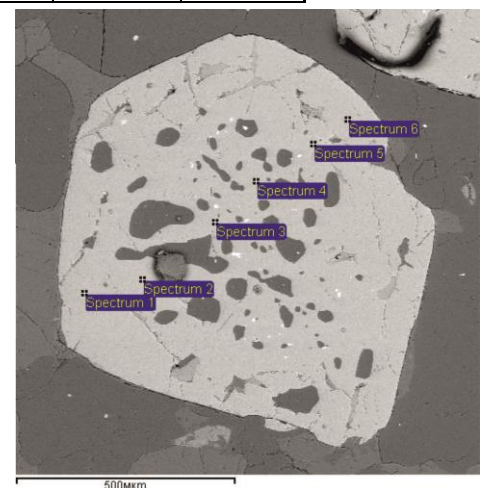


Рис. 5.1.12. профиль изучения химической зональности (значения представлены в таблице 5.1.3.)

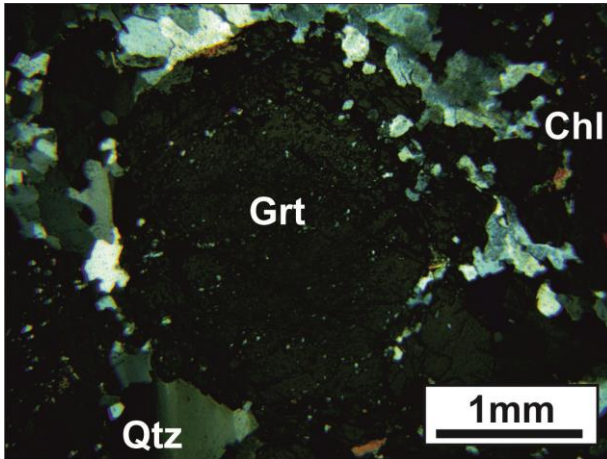


Рис. 5.1.13. Зональный, изометричный, свободный от включений кристалл граната.

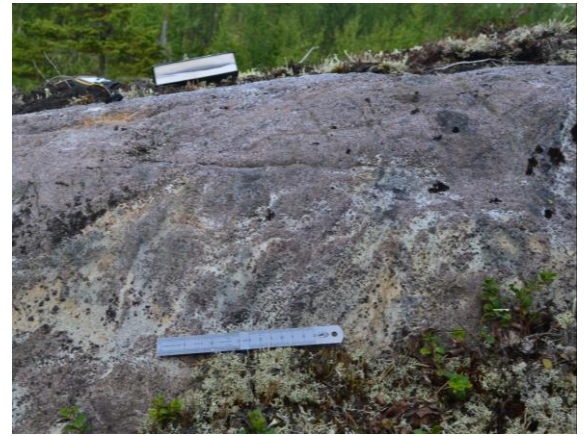


Рис. 5.1.14. Мелкозернистый гранат (**Grt-III**) в мусковит-кварцевом метасоматите.

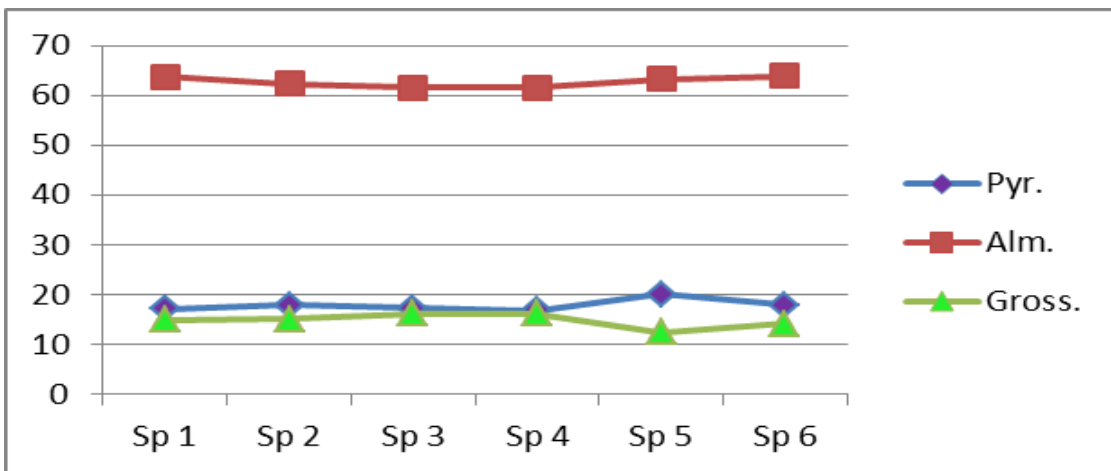


Рис. 5.1.15. Тренд изменения содержания минералов в кристалле *Grt III* тунга (sp1 – кайма кристалла, sp3-4 – центр)

Зерна отличаются низким количеством включений, что характерно для продуктов метасоматоза, как процесса, обеспечивающего чистоту минералов. Если включения присутствуют, то развиты зонально без ориентировки (рис. 5.1.12-5.1.13). Данный тип граната (**Grt-III**) является наиболее равномерно распределенным в рудовмещающих породах, содержание в зонах внутренних метасоматитов может достигать 30% (рис. 5.1.14). 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 5.1.4.

Таблица 5.1.4. Характеристика типов граната

Признак	Grt-I	Grt-II	Grt-III
Кристаллохимическая формула (усредненная)	$\{Fe^{2+}_{1,896}Mn_{0,123}Ca_{0,593}Mg_{0,377}\}_{3,0}[Al_{1,976}Fe^{3+}_{0,035}]_{2,0}(Si_{2,989}Al_{0,011})_{3,0}O_{12}$	$\{Fe^{2+}_{2,107}Mn_{0,051}Ca_{0,503}Mg_{0,324}\}_{3,0}[Al_{1,981}Fe^{3+}_{0,034}]_{2,0}(Si_{2,985}Al_{0,015})_{3,0}O_{12}$	$\{Fe^{2+}_{1,772}Mn_{0,081}Ca_{0,528}Mg_{0,494}\}_{2,9}[Al_{1,856}Fe^{3+}_{0,268}]_{2,1}(Si_{2,876}Al_{0,124})_{3,0}O_{12}$
Содержание 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
Условия формирования	Метаморфизм условий амфиболитовой фации	Метасоматоз Ку-Qtz фации в условиях деформаций	Метасоматоз St-Grt фации

Три выделенных природных типа гранатовых руд различаются наиболее контрастно по совокупности морфологических и химических свойств. Встречаются ситуации, при которых тип конкретного кристалла граната не удастся отличить четко, в этом случае требуется изучение окружающих пород, метасоматической зональности, минеральной ассоциации. По цвету и

морфологии хорошо видны отличия гранатов, сформированных в процессе основного метасоматоза ставролит-гранатовой фации от остальных типов – повышенное содержание CaO, MnO и MgO и пониженное содержание FeO. Это может говорить о высокой подвижности Mg при относительной инертности Fe, что уже было описано для Хизоваарской структуры [Глебовицкий, Бушмин, 1983]. Повышенное содержание кальция соответствует представлениям о фациях основного метасоматоза и упоминалось, как следствие базификации пород месторождения [Проскурин, 2014]. Статистическая схема оруденения по разным типам граната приведена в таблице 5.1.5.

Таблица 5.1.5. Распространение и содержание руд граната разных типов в породах месторождения.

Состав породы	Тип граната
Grt-Bt гнейс (содержание Grt 7,2-20,6%)	Зональный Grt-I
Grt-Qtz-Pl-Ky-Ms/Bt метасоматит по Grt-Bt гнейсам (содержание Grt 15,5-22,8%)	Grt-I, Grt-II
Grt-Qtz-St-Ms метасоматиты по Grt-Bt гнейсам (содержание Grt 10,6-35,5%)	Grt-II
Grt-Qtz-St-Ky-Ms метасоматиты по Grt-Bt гнейсам (содержание Grt 5,9-22%)	Grt-II, Grt-III
Grt-Qtz-Ms метасоматит по Grt-Bt гнейсам (содержание Grt 7,3-13,8%)	Grt-II, Grt-III
Grt амфиболит (содержание Grt 7,2-13,7%)	Зональный Grt-I
Grt-Pl-Qtz-Am-Chl метасоматит по амфиболиту (содержание Grt 6,2-12%)	Grt-I, Grt-II
Am-Bt гнейс с метасоматическим Grt (содержание Grt 2,4-13,2%)	Grt-II
Grt-Pl-Ms-Am-Ky-Qtz метасоматит по Am-Bt гнейсу (содержание Grt 5,5-7,3%)	Grt-II
Grt-Qtz-Ms-Ky-Pl-St-Chl метасоматит по Am-Bt гнейсам (содержание Grt 10,6-12,3%)	Grt-II, Grt-III
Grt-Qtz метасоматит внутренней зоны по Am-Bt гнейсу (содержание Grt 3,25-7,3%)	Grt-III

5.2 Кианит

Важный промышленный минерал, формирование которого связано главным образом с древними метаморфическими структурами. Группа кианита – силлиманит, андалузит и кианит, являются элементами полиморфной системы с общим химическим составом Al_2SiO_5 , и отличиями в кристаллических структурах. Фазовые переходы между тремя этими минералами хорошо изучены и лежат в основе большинства термобарических

моделей. Использование кианита связано с производством огнеупорных изделий, металлургией и сталеплавильным производством. Конечные продукты использования кианита включают цветные металлы, стекло, тормозные колодки, электрофарфор, плитки для пола и стен, литейные формы, сантехнические и другие изделия. К новым направлениям использования относится замещение асбеста, возможности производства алюмокремниевых сплавов [Щипцов, 2004; Заверткин, 2005; Щипцов, 2005].

По данным отчета U.S. Geological survey за 2020 год [Mineral commodity summaries, 2020], мировое производство кианита и родственных ему минералов - андалузита и силлиманита - оценивается более чем в 405 тыс. т. Лидером по производству минералов группы кианита выступает ЮАР (андалузит – 200 тыс. т). Индия является основным производителем силлиманита – 70 тыс. т. Собственно кианитовый концентрат в подавляющем количестве производится в США – 95 тыс. т. При этом мировые запасы минералов группы кианита сосредоточены также в Китае (андалузит и кианит), Франции (андалузит), России (кианит), Перу (андалузит) и др. Перспективы добычи кианита и минералов группы кианита оцениваются как высокие. Ожидается, что спрос на огнеупоры в производстве чугуна и стали увеличится в странах с более высокими темпами роста производства стали (США, Филиппины, Китай, Вьетнам). При этом наблюдается корреляция между потреблением кианит-муллитовых огнеупоров и сталелитейным производством [Mineral yearbook, 2016].

В России находится уникальный в своем роде рудный район Большие Кейвы (Мурманская область Кольский полуостров), на который приходится 90% российских кианитовых ресурсов [Кианитовое сырье, 1988]. На территории района находится 23 месторождения кианита с суммарными оценочными ресурсами 11 млрд. т. Кианит Больших Кейв потенциально может быть использован в качестве альтернативы бокситов, как глиноземистого сырья для производства алюминия [Воротников, 2016]. В Северной Карелии известны

9 месторождений и проявлений кианитсодержащих руд, в большинстве которых кианит является попутным полезным ископаемым. Государственным балансом запасов полезных ископаемых Российской Федерации учтено месторождение кианитовых руд Хизоваара, отнесенное к группе государственного резерва (В+С1 - 2881 тыс. т, С2- 1558 тыс. т и забалансовые запасы 21 101 тыс. т.) Запасы подсчитаны на участке Южная линза, расположенном в 12 км юго-восточнее ж.-д. ст. Еловая и связанном с ней грунтовой дорогой. Для Хизоваарского рудного поля кианит – минерал во многом знаковый. Именно с открытия кианитовых месторождений Северного фланга Хизоваарской структуры началась история изучения рудогенерирующих процессов данной территории. Кианит месторождения Южная линза имеет несколько стадий генерации – собственно метаморфическую и метасоматические стадии [Кианитовое поле, 1988]. Формирование кианита связано с метаморфизмом амфиболитовой фации. На участке протяженностью 950 м. и шириной 80-100 м. разведано до глубины 150 м. шесть крутопадающих залежей кианитовых кварцитов длиной от 154 до 450 м. и мощностью от 2 до 55 м. Обогащение кианитовых руд участка Южная линза производится методом флотации, при этом извлечение кианита в концентрат составляет 65-70%. Минеральный состав концентрата: кианит не менее 90%, кварц-5-10%, слюда - не более 1,5%, полевой шпат и прочие - не более 0,5%; химический состав: Al_2O_3 не менее 55% (до 58,0%), SiO_2 не менее 40%, $(Fe_2O_3 + FeO)$ не более 0,5%, TiO_2 , не более 1,20%, F не более 0,1 %, S не более 0,3%; концентрат представлен фракцией мельче 315 мкм, влажность не более 1%, кажущаяся плотность 3,6 г/см³ [Щипцов, 1997; Заверткин, 2005].

Для месторождения «Высота-181» кианит является попутным минералом комплексных гранатовых руд. Формирование минерала контролируется метасоматозом (метаморфические породы, включающие кианит, не выявлены в пределах месторождения). В главах 2 и 3 подробно рассмотрены как механизмы метасоматоза, так и метасоматические колонки, характерные для них. На

основании этих данных можно судить, что формирование кианита связано с процессом кислотного выщелачивания кианит-кварцевой фации, при котором ряд подвижности компонентов выглядит следующим образом: $MgO/CaO/FeO - Al_2O_3 - SiO_2$ (порядок выщелачивания и переотложения оксидов магния, железа и кальция не имеет значения в данном случае). Содержание кианита будет максимальным во внутренних зонах, сразу перед зоной анхимономинеральных кварцевых метасоматитов, которые редко наблюдаются в пределах месторождения. Идеализированная схема, при которой полиминеральные зоны сменяются кианит-кварцевыми, а затем кварцевыми метасоматитами является скорее исключением в силу многоэтапности и разной химической специализации метасоматических процессов. Самыми продуктивными кианитовыми рудами являются метасоматиты, для которых во внутренних зонах, кроме кианита (до 30%) и кварца (до 65%), содержится гранат (7% в среднем).

Можно выделить два характерных типа кианита, которые относятся к метасоматической генерации: порфиробластический и игольчатый.

Порфиробластический кианит проявлен как продукт метаморфической рекристаллизации пород в условиях кислотного выщелачивания при слабопроявленных деформационных обстановках. Размер кристаллов кианита достигает 10 см., цвет голубой, часто развиты включения и структуры распада (рис. 5.2.1). Наиболее крупные порфиробласты развиты в кварц-кианит-плагиоклаз-мусковитовых метасоматитах, являющихся результатом последовательного кислотного метасоматоза кианит-кварцевой и мусковит-кварцевой фаций по субстрату биотит-амфиболовых гнейсов. Самые высокие содержания кианита отмечены в гранат-кианит-кварцевых гнейсах, что подтверждается результатами минералогического анализа МТП (рис. 5.2.2).

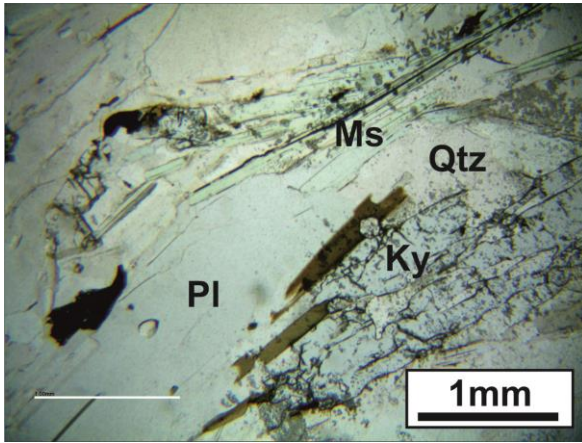


Рис. 5.2.1. Кианит в кварц-кианит-плагиоклаз-мусковитовом метасоматите. Насыщенный голубой цвет кианита хорошо различим в проходящем свете.

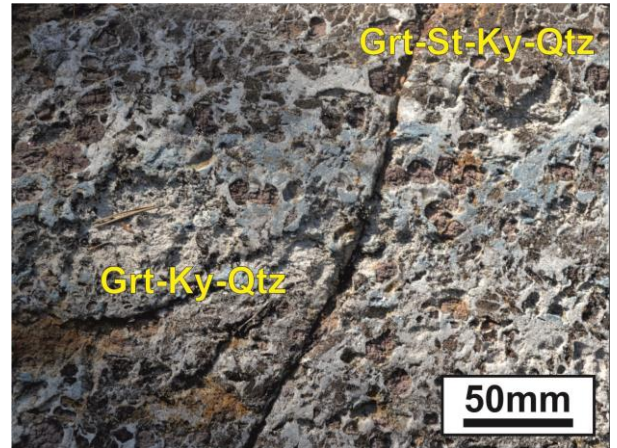


Рис. 5.2.2. Гранат-ставролит-кианит-кварцевые и гранат-кианит-кварцевые метасоматиты, иллюстрирующие переход от четырехминеральной зоны к трехминеральной.

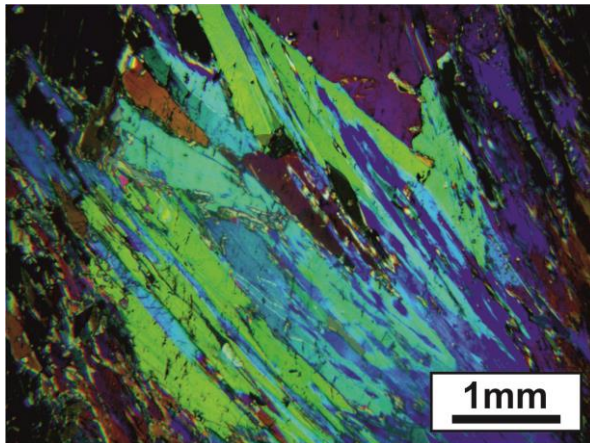


Рис. 5.2.3. Игольчатый кианит.

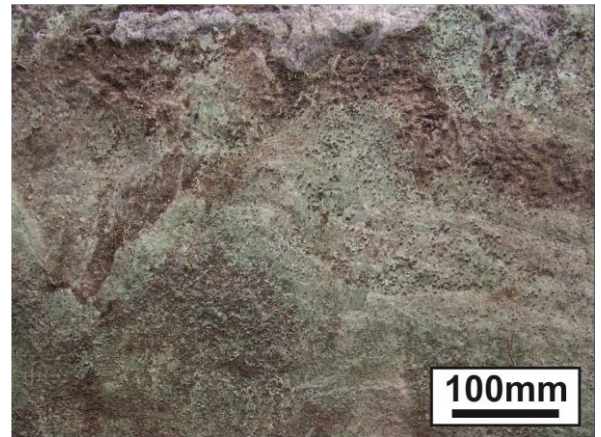


Рис. 5.2.4. зона милонитов гранат-кианит-кварцевого состава с игольчатым кианитом и вкрапленным гранатом.

Второй тип кианита проявлен в зонах сдвиговых деформаций (отражают прогрессивное изменение структур с течением времени). Характеризуется игольчатой формой выделения (рис. 5.2.3.) с частым образованием сноповидных структур в тенях давления и вытянутых игольчатых в зонах милонитизации (рис. 5.2.4). Наиболее продуктивные метасоматиты Grt-Ky-Qtz состава содержат 10-30% кианита.

5.3. Ставролит

Ставролит является промышленным минералом, относящимся к группе высокоглиноземистого сырья. Месторождения ставролитсодержащих пород формируются как результат метаморфизма. Использование ставролита связано с возможностью его использования при производстве стали для ускорения процессов шлакообразования и десульфурации металла в качестве разжижающих добавок. При этом ставролит может являться дешевым и доступным аналогом боксита и плавикового шпата. Содержащийся в ставролите глинозем, закисное железо и другие элементы-основания делают его качественным разжижителем [Кривонос, 1987, Микитюк, 2013]. В Карелии ставролитсодержащие высокоглиноземистые породы распространены в пределах гранит-зеленокаменных поясов и Ладожско-Ботнической зоне [Бубнова и др., 2010]. В пределах Хизоваарского рудного поля ставролит проявлен как минерал метаморфических и метасоматических пород, повсеместно встречаясь на всех перспективных площадях. В Северном фланге структуры широко проявлены ставролитсодержащие биотитовые и кианитовые гнейсы (проявление «Ставролитовая горка»), в отличие от этого в пределах месторождения «Высота-181» ставролит имеет значение как попутный индустриальный минерал комплексных гранатовых руд в метасоматических породах (рис. 5.3.1.). Содержание ставролита не превышает 13%, форма выделения – порфиробласты и пойкилитовые структуры (рис. 5.3.2.), при этом процесс его образования связан с основным метасоматозом ставролит-гранатовой фации. Размеры порфиробластов до 5 см., часто проявлены

включения кварца, и реакционные замещения ставролита кианитом (рис. 5.3.4). Сам ставролит также может быть включением в гранате (рис. 5.3.3.), что является иллюстрацией ставролит-гранатовой фации основного метасоматоза. Последующее замещение ставролита кианитом характеризуется кислотное выщелачивание в условиях подвижности FeO и MgO при инертности Fe₂O₃. Наиболее продуктивные толщи метасоматитов Grt-Qtz-St-Pl состава содержат до 5,3 % ставролита.

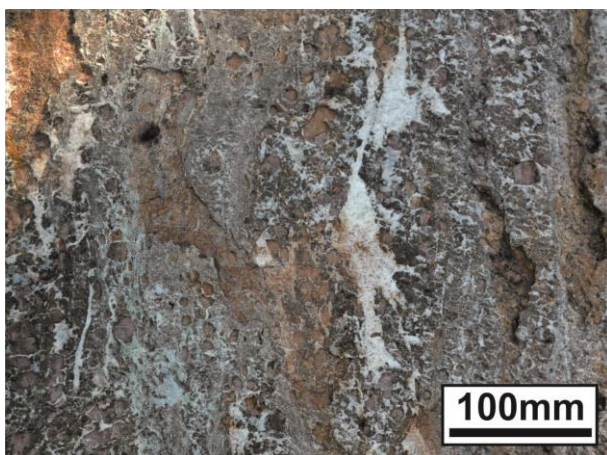


рис. 5.3.1. ставролитсодержащие Grt-Ms-Qtz метасоматиты

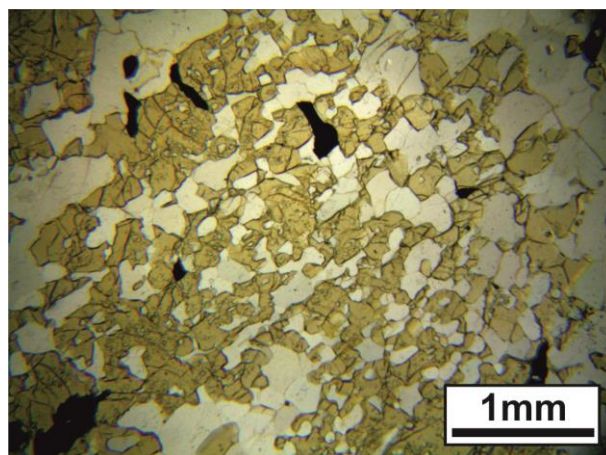


Рис. 5.3.2. пойкилитовые структуры ставролита в гранат-ставролит-кианит-кварцевом метасоматите

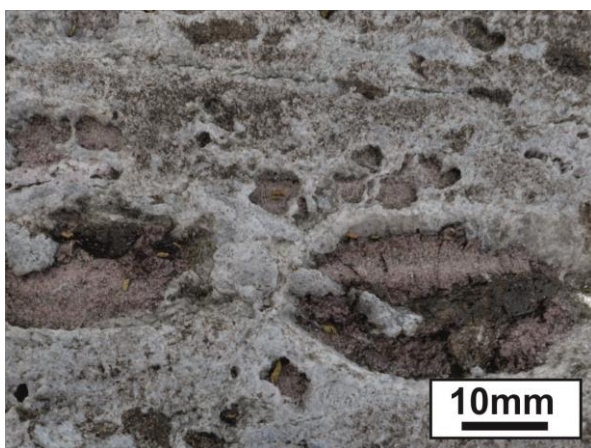


Рис. 5.3.3. включения ставролита в ориентированном гранате. Кристаллы ставролита параллельны гелицитовым структурам.

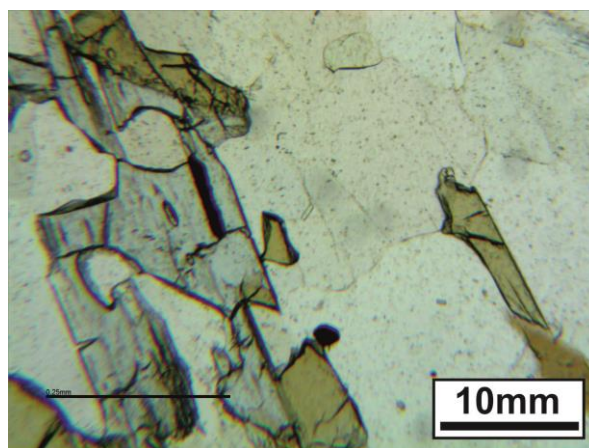


Рис. 5.3.4. Реакционное замещение ставролита кианитом

5.4. Мусковит.

Слюдяная группа представляет собой 37 минералов, которые имеют слоистую или пластинчатую текстуру. Коммерчески важными слюдами являются мусковит и флогопит, которые используются в различных областях. Мусковит является основной слюдой, используемой в электротехнической промышленности для изготовления конденсаторов на основе слюды, которые могут работать в средах с температурами и (или) частотами, которые слишком высоки для полипропиленовых конденсаторов. Слюды характеризуются химической инертностью, диэлектрическими, эластичными, гибкими, гидрофильными, изоляционными, легкими, пластичными, отражающими, преломляющими и упругими свойствами. Слюда устойчива при воздействии электричества, света, влаги и экстремальных температур [Mineral yearbook, 2016]. Мировое производство слюд на 2018 г. составило 340 тыс. т. при лидерстве Китая, Финляндии и США. Ресурсы чешуйчатой слюды находятся в залежах глины, гранитах, пегматитовых месторождениях и сланцах метаморфических комплексов. Известно, что крупные месторождения слюдосодержащих пород существуют в таких странах, как Бразилия, Индия и Мадагаскар. Ограниченные ресурсы листовой слюды доступны в Соединенных Штатах [Mineral commodity summaries, 2020].

Важнейший для Хизоваарской структуры минерал, месторождение которого было разведано в пределах Северного фланга [Родионов, 2001]. Месторождение «Межозерное» приурочено к амфиболитам, гранат-биотитовым и амфибол-биотитовым гнейсам Хизоваарской свиты, в стратиграфическом плане коррелирующими с породами месторождения «Высота-181». Для данного месторождения автором были рассмотрены условия образования мусковитовых руд и влияние метасоматических процессов на совместное появление и чистоту мусковита [Никифоров, Бубнова, 2018]. Для месторождения «Высота-181» схемы появления мусковита во многом схожи для аналогичных типов метаморфического субстрата и связаны с кислотным

выщелачиванием мусковит-кварцевой и кианит-кварцевой фаций. Необходимо отметить, что чистые обстановки кислотного выщелачивания мусковит-кварцевой фации не выявлены, таким образом в ряде случаев промежуточные зоны содержат большее количество минералов, чем в породах субстрата (неравновесные минеральные фазы, табл. 5.4.1).

Табл. 5.4.1. общий случай формирования мусковита в амфибол-биотитовых и гранат-биотитовых гнейсах, жирным шрифтом выделены минералы, участвующие в идеализированной схеме выщелачивания, реальный состав внутренних зон как правило включает гранат и/или кианит:

Субстрат	Метасоматические зоны			
	внешние	промежуточные		внутренние
+/-Амфибол	+/ Ставролит	+/- Ставролит	+/- Кианит	+/- Гранат
Плагиоклаз	Плагиоклаз	+/- Кианит		
Гранат	Гранат	Гранат	+/- Гранат	
Биотит	Мусковит	Мусковит	Мусковит	
Кварц	Кварц	Кварц	Кварц	Кварц

На практике встречаются гранат-биотит-мусковитовые гнейсы, полностью сохраняющие облик, структуры и текстуры породы субстрата, но с замещением биотита на мусковит и пропорциональным исчезновением плагиоклаза. Данные ситуации иллюстрируют высокую подвижность кальция и характерны для всей Хизоваарской структуры [Послемигматитовый метасоматоз, 1983].

Необходимо отметить, что мусковит месторождения «Высота-181» является попутным минералом в комплексных гранатовых рудах, но обладает важным преимуществом по сравнению с мусковитом месторождения

«Межозерное». Мусковитсодержащие кварцевые метасоматиты «Межозерного» содержат минералы подгруппы каолинита – каолинит, диккит, накрит, что подтверждается анализом на автоматическом дифрактометре ARL X TR (ИГ КарНЦ РАН). Каолинит преобладает у 66,5% проб, диккит диагностируется в 2,5% проб, накрит - у 9% проб. Часть проб (22%) не содержат минералов группы каолинита [Скамницкая и др., 2012] В процессе измельчения каолинит вскрывается, увеличивая выход шламистой фракции (-0,1мм), а в межпакетных срастания с мусковитом снижает плотность крупных выделений мусковита и нарушает селективность гравитационного разделения.

Продукты пробного обогащения метасоматитов месторождения «Высота-181» с выделением мусковит-кварцевого концентрата были проанализированы (РСА, 4 шт). Все анализы показали отсутствие каолинита в концентратах. Можно сделать вывод, что мусковитсодержащие метасоматиты месторождения «Высота-181» более приспособлены к качественному обогащению (до кварц-мусковитового концентрата). Наиболее продуктивные толщи слюдистых милонитизированных метасоматитов Grt-Ms-Qtz состава содержат 12-58% мусковита. Результаты РСА приведены в Приложении 2.

5.5. Кварц.

Кварц является, наряду с плагиоклазом и амфиболом, основным породообразующим минералом пород месторождения. В промышленности основное внимание уделяется особо чистым формам кварца, мировой спрос на сырье возрастает регулярно, особенно с развитием цифровых технологий и высокоточного приборостроения [Mineral commodity summaries, 2020]. Принципы минерагенического анализа для кварцевых руд на территории Карелии, а также ресурсная база достаточно хорошо изучены, в том числе в пределах Хизоваарского рудного поля [Щипцов и др. 2001]). Формирование кварца связано с метаморфическими и постметаморфическими процессами [Никифоров, 2016]. Перекристаллизованный кварц метасоматического и гидротермального генезиса наиболее перспективен для выделения особо

чистых разновидностей. Вместе с тем, зоны интенсивной милонитизации, наиболее сильно выщелоченные до формирования анхимономинеральных кварцитов сложены наиболее деформированными зернами кварца, что отрицательно влияет на качество продукта [Данилевская и др. 2004]. Содержание кварца достигает 85% в кварцевых метасоматитах (конечных продуктах кислотного выщелачивания).

5.6. Другие рудные минералы

С внутренними зонами кислотного выщелачивания связано формирование пирита, содержание которого в Qtz-Ky-Py и Qtz-Py парагенезисах может достигать 15%. Данный процесс описывался для метасоматитов и связанных с ними кианитовых руд северного крыла Хизоваарской структуры [Послемигматитовый метасоматоз, 1983, Хизоваарское кианитовое поле, 1988]. В метаморфических и метасоматических комплексах развиты ильменит, рутил, титаномагнетит.

Выводы:

Результаты исследований показывают, что на месторождении "Высота-181" развиты три природных типа гранатовых руд, отличающихся по морфологии, химическому составу и парагенетическим ассоциациям, что напрямую влияет на состав и качество концентрата. Кроме граната, на месторождении развиты руды кианита, мусковита и ставролита, присутствует кварц нескольких генераций, пирит, рутил и титаномагнетит.

Глава 6. Природные и технологические типы комплексных руд

6.1. Методика минералого-технологического картирования

Геолого-технологическое картирование является важной и неотъемлемой частью геологоразведочных работ. Проводится оно на основе детального изучения различной информации о свойствах и характеристиках образцов и рядовых проб, пространственной изменчивости вещественного состава и выделения тех или иных признаков (это может быть содержание минералов, особенности их состава, свойств, формы нахождения и пр.). В результате становится возможным оконтуривание и выделение в пространстве комплексов полезных ископаемых с близкими свойствами, и, соответственно, выделение как природных, так и технологических типов и сортов руд. Помимо этого, изучение пространственной изменчивости свойств породообразующих минералов позволяет не только выявить факторы, влияющие на вариации геолого-минералогических и технологических параметров, но и существенно дополнить или развить эволюционную модель месторождения [Левченко, 2012].

Критериями выделения технологических типов руд являются различия в схемах обогащения или качестве концентратов. При этом, в первую очередь анализируются характеристики минерального сырья, непосредственно влияющие на технологический процесс - структурно-текстурные особенности, качественно-количественный состав исходной руды, присутствие минералов, близких по свойствам, используемым в технологии обогащения. Немаловажно и изучение факторов, определяющих типоморфные особенности руд и минералов и косвенно сказывающихся на технологических процессах [Изоитко, 1997]. Таким образом, технологическое картирование направлено на анализ закономерностей в изменении тех или иных свойств минералов, выявление особенностей обогащения, установление закономерных количественных связей между вещественным составом и показателями переработки сырья. В идеальном варианте, конечным результатом геолого-технологического картирования является создание геолого-технологической модели

месторождения как составной части экономической модели предприятия [Петров, 2010], необходимой для оптимизации горно-обогатительных работ на основе интеграции геолого-минералогических знаний и горной инженерии. В настоящее время компьютерное моделирование широко используется для месторождений углеводородов с созданием трёхмерных постоянно действующих цифровых геолого-технологических моделей, использующихся как для прогнозирования разработки месторождений, так и мониторинга их эксплуатации [Сыртланов, 2007; Хисамов, 2008; Создание и использование, 2012].

Для повышения качества проектирования, управления и контроля за разработкой нефтяных и газонефтяных месторождений в 2000 г. Минтопэнерго России утвержден и введен в действие Регламент по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей нефтяных и газонефтяных месторождений [РД 153-39.0-047-00 Регламент по созданию, 2010].

В последние десятилетия активно развивающийся за рубежом подход к изучению месторождений, объединяющий геолого-минералогические науки, геомеханику, технологию и экологию, получил название *geometallurgy* - геометаллургия [Dominy, O'Connor, 2016]. Создание пространственных геолого-технологических моделей практикуется на крупных рудных месторождениях для контроля и снижения рисков проектируемых и действующих предприятий [Dobby et al., 2006; Baumgartner et al., 2013] или в процессе работ по переоценке и доразведке [Ehrig, 2012]. Тем не менее, уменьшение количества богатых месторождений, снижение содержания полезных компонентов, вовлечение в переработку руд сложного пространственного расположения и текстурно-структурных особенностей, более строгие экологические требования наряду с увеличением количества отходов и прочие причины, вызывают необходимость использования принципов геолого-технологического моделирования при изучении небольших месторождений и различных видов минерального сырья [Glass, 2016; Silva, 2018].

Геолого-технологическая оценка месторождения, проведенная для выделения природных и технологических типов комплексных руд была проведена на месторождении «Высота-181» с несколькими целями:

-Определение обогатимости руд на ранних стадиях геолого-разведочных работ с построением технолого-минералогических моделей с целью выбора первоочередных объектов для разведки.

-Выделение технологических типов руд, количественное прогнозирование и оценка изменчивости поведения при обогащении руд разных природных комплексов, блоков, горизонтов и типов с построением геолого-технологических моделей месторождений на основе зависимостей между вещественным составом руд и показателями их переработки. Технологический тип руды — руда устойчивого минерального и химического состава, которая перерабатывается по определенной схеме обогащения. Основное условие выделения технологического типа — возможность его отдельной добычи и переработки. Технологический тип руды может быть связан с разными по генезису и структурно-текстурным характеристиками породами и объединять несколько природных типов руд.

Выделение технологических типов руд основано на трех важных критериях:

- Возможность совместной добычи руды (удобное пространственное расположение, геологическое строение оруденелых комплексов)
- Близкий минеральный и химический состав руд
- Возможность использования единой схемы обогащения для каждого технологического типа руды.

Важным этапом моделирования является корректное и полное минералого-технологическое картирование выбранного участка. Основной задачей минералого-технологического картирования является установление

закономерностей технологических свойств пород [Изоитко, 1997]. Таким образом, выбранный метод картирования должен не только фиксировать геологические факторы, контролирующие оруденение, но и обобщать информацию, позволяющую выделять технологические типы руд.

Минералого-технологическое картирование проводится в два этапа: геологическое и собственно минералого-технологическое картирование. Этап геологического картирования подробно описан в предыдущих главах, последним шагом является выделение природных типов комплексных руд (выделение природных типов комплексных руд основано в том числе на результатах проведенного выделения природных типов гранатовых руд (глава 5)).

6.2. Природные типы комплексных руд

Вопрос выделения природных руд в пределах Хизоваарского рудного поля в целом и месторождения «Высота-181» в частности решался разными способами, в зависимости от поставленных перед исследователями задач. Волотовская и соавторы [Волотовская, Жиров, 1941] при составлении карт и схем руководствовались принципом петрографического разделения свит Хизоваарской структуры с выделением рудоносных участков. В 37 томе сборника «Геология СССР» [геология СССР, 1960] приведены карты выделенных к тому времени рудоносных участков Хизоваарской структуры и вмещающих их пород. В дальнейшем, акцент на выделении рудоносных участков продолжали работы и отчеты сотрудников ИГ КарНЦ РАН, Чупинской группы. [Родионов, 2001, Гранатовые руды Карелии, 2005, Кианитовое поле, 1988]. С. А. Бушмин [Геологическая съемка метаморфических, 1996] указывает на два основных подхода к картированию метасоматических комплексов. Первый подход основывается на описании петрографического состава метасоматических зон. Второй подход основан на фациальной основе, что соответствует выделению на геологических картах метасоматических фаций и формаций. При петрографическом подходе на карте

можно разделить породы метаморфического и метасоматического генезиса, сформировавшиеся в единых физико-химических условиях, но имеющих принципиально различный минеральный состав, что важно для поисково-оценочного этапа ГРР. Минусом является тот факт, что петрографический подход позволяет объединить в единые комплексы породы с высоким содержанием определенного легко выделяемого при картировании минерала (или минералов), при этом формирование данных пород связано с различными физико-химическими процессами. Например, гранатовые породы месторождения «Высота-181» при первых попытках рекогносцировки и картирования выделялись в единые комплексы (гранат-ставролит-полевошпатовые, гранат-кианит-кварцевые и гранат-мусковит-кварцевые метасоматиты, гранат-биотитовые гнейсы – [Гранатовые руды Карелии, 2009]. Условия формирования данных пород различны и составленная на основе данного подхода карта не позволит получить представление о содержании руд ставролита, кианита, мусковита и кварца. При картировании на основе фаций возможно объединить породы и парагенезисы, сформированные в поле единых физико-химических условий. Детальность картирования может быть различной, но развитие процессов окварцевания, выщелачивания, маркирующие кислотный метасоматоз и обогащение породы основаниями и щелочами, характерное для основного метасоматоза, могут обобщать информацию на мелкомасштабных картах. Выделение зон, сформированных в единых термобарических условиях применимо для среднемасштабных карт и, реже, для крупномасштабных. Крупномасштабное картирование на основе фаций не позволяет показать мелкие детали и может быть основано на обобщении всех вариантов состава в поле единой фации. Автором 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 руды 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. Результаты минералогических анализов МТП приводятся в таблице 6.2.1.

Таблица 6.2.1. Результаты минералогического анализа малых технологических проб.

Характеристика породы	Но мер	Grt %	Ms %	Ky %	St %	Qtz %	Pl %	Bt %	Am %	Прочие	Сум ма
Grt амфиболит	1	7,2	0	0	0	8,3	19,7	0	64,1	0,7	100
Grt амфиболит	2	17,3	0	0	0	16,2	11,5	0	52,7	2,3	100
Grt амфиболит	3	17,9	0	0	0	15,5	7,2	0	52,8	6,6	100
Grt амфиболит	4	13,7	0	0	0	12,2	5	0,46	67,7	0,89	100
Grt-Bt-Qtz метасоматит	5	12,53	0,08	0,1	0	46,4	0,36	39,9	0	0,56	100
Grt-Bt гнейс	6	8,1	1	0	0	50,7	23,2	13,2	0	3,8	100
Grt-Bt гнейс	7	20,6	0,03	0	1,03	50	21,12	5,53	0	1,6	100
Grt-Bt гнейс	8	7,2	3,1	1,2	0,6	50,7	27,8	8,9	0	0,5	100
Гранатит	9	58,5	0,9	1,88	0,1	26,6	4,96	0	0	6,9	100
Am-Bt гнейсы	10	13,2	0,2	0,8	0	45,2	17,7	3,9	12,2	0,9	100
Am-Bt гнейсы	11	2,4	2,4	0	0	38,8	26,7	11,5	17,4	0,5	100
Grt-Ms гнейс (метасоматический)	12	9,2	12	0	0	55,4	17,7	2,4	0	3,3	100

Ку-Qtz-Ms метасоматит	13	7,26	58	10,7	2,4	17,2	1,3	0,43	0	2,6	100
Grt-Ms гнейс	14	13,1	7,7	0	0	64,7	9,1	4,2	0	1,2	100
Grt-Ms гнейс	15	24,8	12,7	3,2	0	46,9	9,5	1,5	0	1,4	100
Grt-Ms-Qtz метасоматит	16	9,2	14,8	0	0	65,4	6,9	2,8	0	0,9	100
Grt-St-Ms-Bt метасоматит промежуточной зоны по Am-Bt гнейсу	17	10,6	8,4	0	3,7	34,3	11,7	7,2	16,1	8	100
Метасоматит внешней зоны по Am-Bt гнейсу	18	5,5	4,2	0	0	31,4	21,4	13,7	19,2	4,6	100
Grt-St-Am гнейс внешней зоны по Am-Bt гнейсу	19	12,3	4,2	0,3	5,2	36,8	29,4	1,1	6,4	4,3	100
Сложный метасоматит по амфиболиту	20	6,2	0	0,2	8,1	56,4	18,4	0	6,4	4,3	100
Метасоматит промежуточной зоны по Am-Bt гнейсу	21	7,3	9,1	4,2	0	41,6	28,7	3,7	3,9	1,5	100
Grt-Pl-Ms-Ку-Qtz метасоматит	22	11,6	9,8	16,5	0,8	45,8	9	4,2	0	2,3	100
Grt-Ку-St-Ms метасоматит по Am-Bt гнейсу	23	11,8	8,1	5,3	6,2	56,5	8,2	1,2	0,6	2,1	100
Grt-Ms-Ку-Qtz метасоматит промежуточной зоны	24	13,1	8,9	15,1	2,8	50,1	5,1	2,7	0	2,2	100
Grt-Ку гнейс,	25	12,7	2,6	18,5	1,8	42,4	14,9	5,8	0	1,3	100

внешняя зона											
Grt-Ky-Pl-Qtz метасоматит	26	22,8	3,77	11,46	1,95	43,8	12,7	1,82	0	1,56	100
Grt-Ky-Qtz метасоматит внутренняя зоны	27	13,4	1,9	30	1,2	46,8	4,2	0,3	0	2,2	100
Grt-St-Ky-Qtz метасоматит внутренней зоны	28	29,7	2,1	11,8	4,3	37,2	6,1	6,6	0	2,2	100
Grt-St-Ky-Qtz метасоматит	29	21,9	3,05	17,19	5,16	51,09	0	0,1	0	1,47	100
Grt-Ky-Ms-Qtz метасоматит	30	9,02	24,8	20,6	0,43	40,2	0	3,82	0	1,03	100
Ky-Ms-Qtz метасоматит	31	3,25	28,8	10,47	0,86	51,4	0	4,8	0	0,34	100
Grt-St-Ky-Qtz метасоматит внутренней зоны	32	35,5	0,5	14,4	13	31,7	0,2	0,1	0	4,6	100
Grt-Ky-Bt-Qtz метасоматит	33	11,04	0,5	8,6	0,8	61,92	0	15,74	0	1,4	100
Grt-Ms-Qtz метасоматит внутренней зоны	34	13,8	6,4	4,2	1,1	65,8	5,2	1,8	0	1,7	100
Grt-Ky-Qtz метасоматит внутренней зоны	35	15,6	2,1	23	0	47,5	8	1,5	0	2,3	100

Использование упрощенных карт площадного распределения промышленных минералов (без выделения пород субстрата и деформаций, полные карты показаны в главе 4) показывают, что существуют зоны наложения участков с высокими содержаниями промышленных минералов (рис 6.2.1).

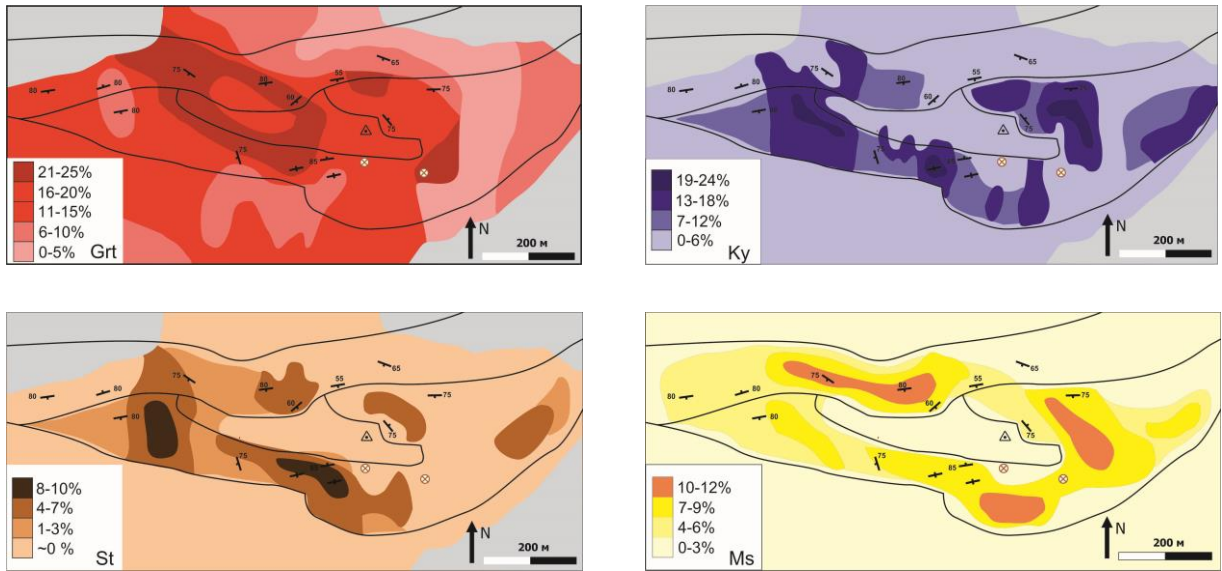


Рис. 6.2.1. Карты распределения промышленных минералов

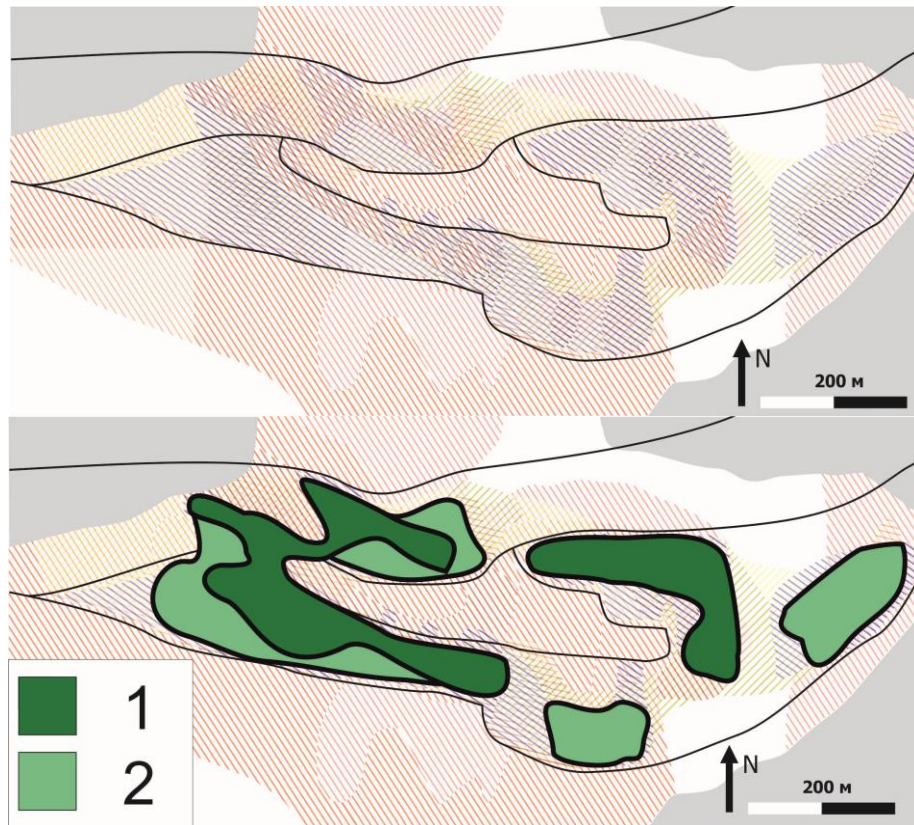


Рис. 6.2.2. Результат наложения карт распределения промышленных минералов. 1. – комплексные руды трех минералов. 2. – комплексные руды двух минералов.

Наложение карт распределения промышленных минералов показывает, что существует три области развития комплексных руд с высоким содержанием трех промышленных минералов и ряд областей развития комплексных руд с

двумя промышленными минерала. Остальная территория месторождения связана с рудами граната, содержащими и не содержащими другие промышленные минералы. На основании геологической съемки, построения структурных моделей и минералогического картирования руд 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-Bt гнейсам – **Pl-Ky-Grt-Qtz-Bt** (5408 м²/162240 м³)
6. Основные метасоматиты гранат-ставролитовой фации по Am-Bt 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-Bt гнейсов – **Qtz-Grt-Ky-Ms+/-Am** (69417 м²/2082510 м³).

Распределение содержаний промышленных минералов на треугольной диаграмме Grt-Ms-Ky+St (рис 6.2.3) 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. Выбивающиеся на рис. 6.2.5 значения иллюстрируют редко проявленные метасоматиты внутренних зон с низким содержанием граната. Амфибол-биотитовые гнейсы представлены единственным 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. 6.2.4.), которая подтверждает разделение всех руд месторождения на три типа и показывает, что массовое содержание промышленных минералов может достигать 75%.

Таким образом на месторождении «Высота-181» выявлены 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, относительное их содержание находится в прямой зависимости от минеральной ассоциации.

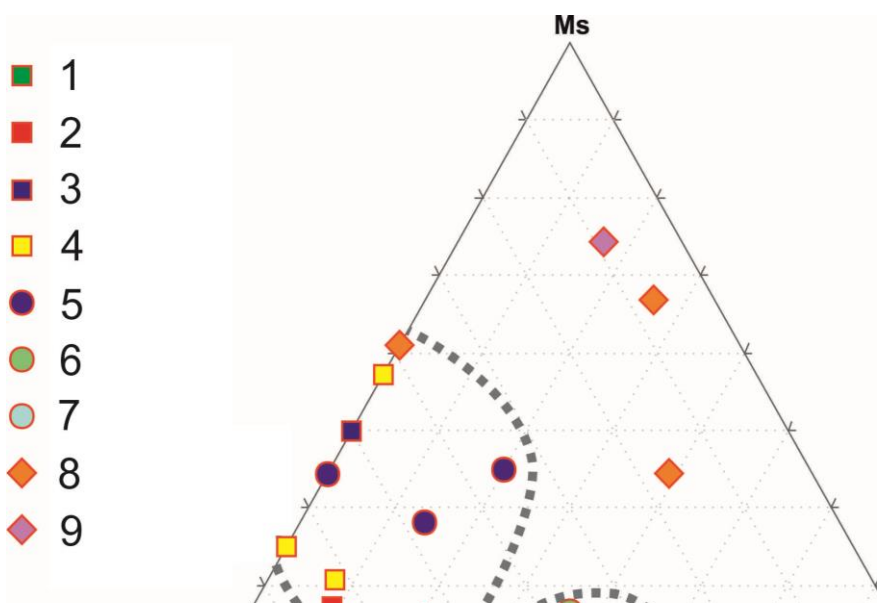


Рис. 6.2.3. распределение минеральных составов комплексных руд на диаграмме $Ky+St - Ms - Grt$. 1. Гранатовые амфиболиты; 2. гранат-биотитовые гнейсы; 3. амфибол-биотитовые гнейсы (метасоматизированные); 4. гранат-мусковитовые гнейсы; 5. поздние кислотные метасоматиты по субстрату передовых зон метасоматоза 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.

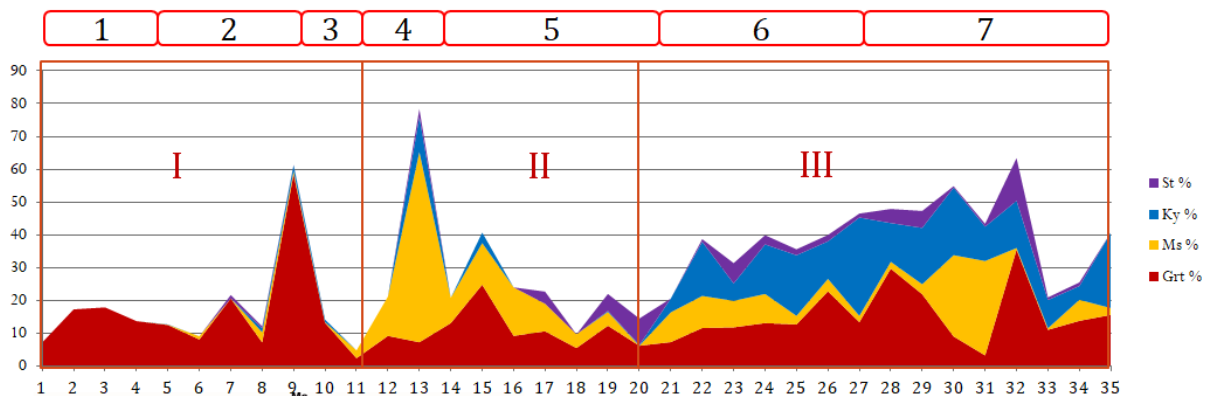


Рис. 6.2.4. Диаграмма, отражающая количественные содержания промышленных минералов в пробах. Верхняя нумерация в подписи к рис. 6.2.3. Нижние номера отражают отдельные пробы согласно таблице

6.2.1.

Подсчет прогнозных ресурсов проводился на основании данных по средним содержаниям минералов в МТП, объемам пород.

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]. Данные по подсчету сведены в таблицу 6.2.2.

Таблица 6.2.2. 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.				Коэф. Надежности.	Объем руды, тыс. куб. м.				Прогнозные ресурсы, тыс. т			
				Gr t	Ky	Ms	St		Grt	Ky	Ms	St	Grt	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	1178 0					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

6.3. Технологические типы комплексных руд

Минералого-технологическая характеристика рудовмещающих пород приводится с целью описания рудных парагенезисов для последующего выявления особенностей селективного разрушения минералов при раскрытии сростков. Так как все комплексные руды месторождения являются гранатовыми, характеристика строится на характере и морфологии гранатовых зерен и порфиробластов в сростании с попутными минералами и минералами вмещающих пород. Описание базируется на природных типах комплексных руд.

I. Преимущественно гранатовые руды.

- Гранатовые амфиболиты – Grt I-Pl-Am. Метаморфическая порода с крупнокристаллической структурой и массивной текстурой. Полезный компонент – гранат, проявленный в виде порфиробластов и характеризующий внешние зоны метасоматоза. Сростки граната с амфиболом равномернозернистые. Сам гранат содержит включения (в том числе микроскопические) кварцевого, хлоритового и кальцитового состава до 5-10%.

- Гранат-биотитовые гнейсы – Grt I-Bt-Pl-Qtz. Метаморфическая порода с крупнокристаллической структурой и гнейсовидной текстурой. Полезный компонент – гранат, проявленный в виде порфиробластов и образующий сростания с биотитом в меланократовых полосах. Сростки граната с биотитом зачастую характеризуются как катаклазитовые. Гранат содержит включения (в том числе микроскопические) кварцевого, хлоритового и кальцитового состава до 5-10%.

- Гранат-кварцевые метасоматиты – Grt III-Qtz+/-Grt II. Метасоматическая горная порода кремнеземнистого состава с порфиробластическим гранатом (Grt III). Гранат образует сростки с кварцем, редко с реликтовыми минералами (слюдами и кианитом). Зерна граната практически свободны от включений, а сами включения могут характеризоваться как макроскопическая вкрапленность, успешно удаляемая традиционными методами обогащения.

- Гранатиты – Grt+/-Cal+/-Turm+/-Qtz+/-Chl. Анхимономинеральные породы с характерными сростаниями граната в жильных телах с турмалином, кальцитом, кварцем. В некоторых случаях выделяются щетки в жилах гранатового состава. Локальные тела, приуроченные к контактам между метаморфическими комплексами и характеризующие сброс оснований, сопровождающий кислотный метасоматоз.

II. Преимущественно гранат-ставролит-кианитовые руды.

- Основные метасоматиты по субстрату внешних зон метасоматоза кислотной фации Grt-Ky-Qtz состава - (Grt II+Grt III)-St-Ky-Qtz+/-Ms. Полнокристаллические породы с метасоматической структурой. Полезные компоненты – гранат, ставролит, кианит. Гранат порфиробластический, иногда скелетный, образующий сростания со ставролитом. Часты включения ставролита в гранате. Кианит образует как независимые порфиробласты в кварцевом и кварц-мусковитовом матриксе, так и псевдоморфозы по ставролиту. Кристаллы кианита таблитчатые, крупно- и среднезернистые.

- Внешние зоны кислотного метасоматоза по Am-Vt гнейсам – Pl-Ky-Grt-Qtz-Vt. Полнокристаллическая метасоматическая порода, характеризующаяся крупными порфиробластами граната, кианита и плагиоклаза. Эти минералы чаще всего образуют политипные сростания. Ставролит скелетный, встречается в виде линзовидных тел. Количество включений кварцевого состава в гранате как правило невелико (до 7%).

- Основные метасоматиты гранат-ставролитовой фации по Am-Vt гнейсам – Grt III-St-Pl-Qtz+/-Am. Метасоматическая порода с высоким содержанием ставролита, выполняющего анхимономинеральные линзы (Qtz-St состава) в матриксе Ms-Grt-Qtz-Ky состава. Гранат мелкозернистый, без включений, образует сплошную вкрапленность в породе. Кианит скрытокристаллический, часты псевдоморфозы кианита по ставролиту.

III Преимущественно гранат-кианит-мусковитовые и гранат-мусковитовые руды.

- 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. Катаклазиты кварц-мусковитового состава, вмещающие оруденение граната. Гранат мелкозернистый, без включений. Породы милонитизированы с образованием межпакетных срастаний мусковит-кварц (встречаются также сульфиды).

- Гранат-мусковитовые гнейсы - Grt I-Ms-Pl-Qtz+/-Grt II. Внешне метаморфическая горная порода, аналогичная по текстуре гранат-биотитовому гнейсу, но вмещающая оруденение мусковита.

- Поздние кислотные метасоматиты по субстрату внешних зон метасоматоза кислотной фации Grt-Ky-Qtz состава (ранние метасоматиты) - Grt II-Ky-Ms-Qtz+/-Grt III. Зональные метасоматические породы с чередующимися зонами – Grt II-Ky-Qtz/Grt III-Ms-Qtz. Чередование идет через десятки сантиметров/метры, поэтому целесообразно выделить единую породу, вмещающую преимущественно Grt-Ms оруденение. Кианит в этих породах проявлен двумя типами – таблитчатый (ранний) и игольчатый (более поздний). Гранат может иметь самые разные составы и формы, образуя порой сложную зональность.

- Продукты кислотного метасоматоза двух последовательных этапов по субстрату Am-Vt гнейсов – Qtz-Grt-Ky-Ms+/-Am. Сильно милонитизированные породы с крупнозернистым катакластическим гранатом неизометричных, вытянутых форм, с трещинами, залеченными кварцем. Мусковит образует анхимономинеральные линзовидные тела.

Проводимые в разное время (сотрудниками ИГ КарНЦ РАН, в том числе автором) работы по пробному обогащению различных типов руды показывают отличия в обогащении слюдистых, амфиболсодержащих и безслюдистых безамфиболовых пород. В процессе обогащения гранатовых и гранат-ставролит-кианитовых руд в результате магнитной сепарации в хвосты удаляются полевой шпат, кианит и кварц, а также их сростки с гранатом, ставролитом, биотитом. На обогащение на концентрационный стол поступает черновой гранатовый концентрат, представленный смесью граната, ставролита и биотита, кварц присутствует в виде включений в гранате и ставролите. Таким образом, для гранатовых руд без попутных полезных компонентов, гранатовый концентрат высокого качества получается непосредственно после магнитной сепарации. Содержание в концентратах граната в сумме со ставролитом составляет 93-95 %, в крупных фракциях массовая доля их достигает 97,5-98,5 % [Гранатовые руды Карелии, 2009]. Для комплексных гранат-ставролит-кианитовых руд необходимо последующее дообогащение кианита из хвостов магнитной сепарации. Выбранная за оптимальную магнито-гравитационная схема обогащения включает дезинтеграцию исходной руды, классификацию измельченного материала (по классу 1 мм), магнитную сепарацию обесшламленного (по классу -0,1 мм) продукта и отдельную концентрацию на столе магнитного и немагнитного продуктов (рис. 6.3.1).

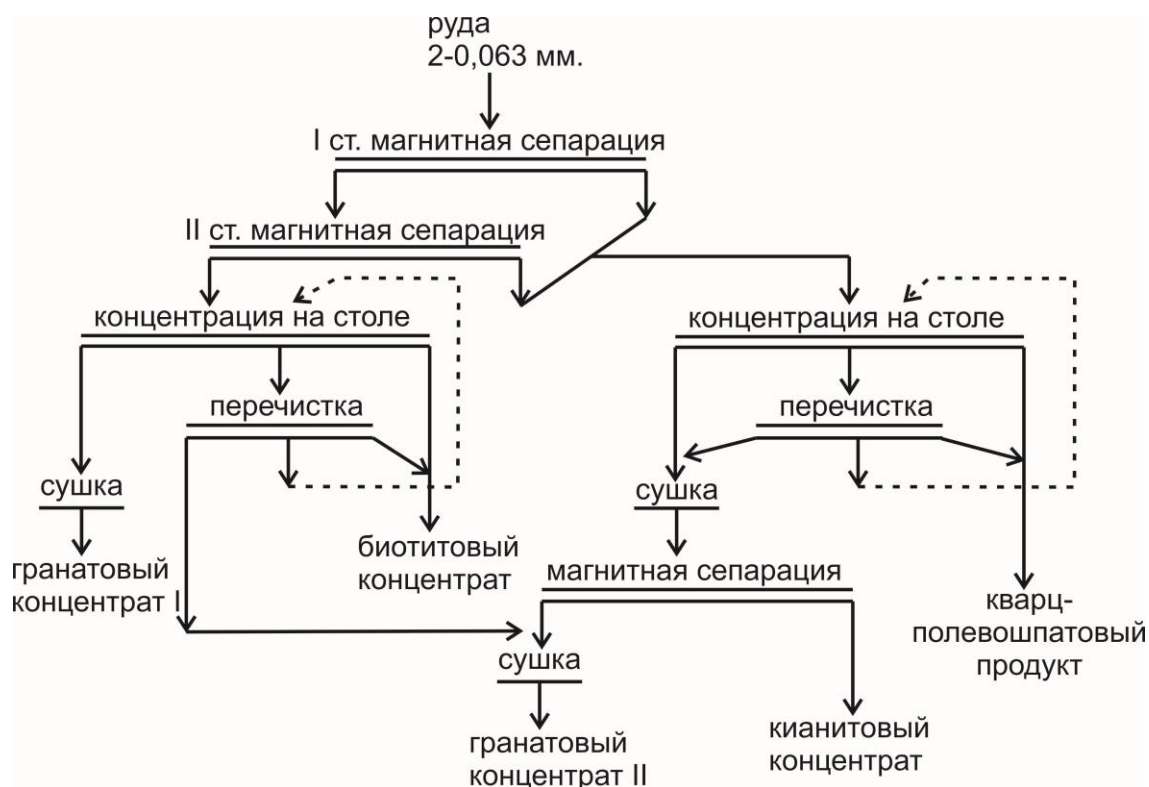


Рис. 6.3.1. Схема обогащения комплексных гранатовых руд проявления «Высота-181» [Щипцов и др..., 2014].

Таблица 6.3.1. Усредненная техническая характеристика Grt концентрата месторождения «Высота-181»

Основные показатели	Значения
1. Химический состав, в %	
SiO ₂	38-39
TiO ₂	0.1
Al ₂ O ₃	22-23
Fe ₂ O ₃	0.2-0.8
FeO	24.0-26.0
CaO	2-7
MgO	5-8
2. Минеральный состав, %	
Гранат, в т.ч. в %, не менее	90.0
- альмандин	60.0
- альмандин-пироп	20.0
- гроссуляр	7-10.0
- андрадит	0.5-2
Кварц	3-4
Слюда	4-5

Кианит	1-2
Прочие	1.0
3. Физико-механические свойства	
Твердость	7.5
Микротвердость, кг/см ²	1200-1400
Плотность, г/см ³	3.7-3.8
Насыпная плотность, г/см ³	2.0
Гранулометрический состав, мкм	5-630
Точка плавления	1250 ⁰ С

Обогащение гранат-мусковитовых руды в силу высоких технологических различий полезных компонентов может проводиться с использованием разработанных для мусковитсодержащих пород Северной Карелии методов [Щипцов и др., 2003]. Для разделения граната и мусковита целесообразно использоваться магнитную сепарацию, для дообогащения мусковита применима концентрация на столах, пенная флотация и пенная сепарация.

Существенные различия в процессах обогащения наблюдаются для руд, содержащих мусковит как попутный полезный компонент и не содержащих таковой, что позволяет говорить о двух типах технологических комплексных руд: Grt-St-Ky (I и II природные типы комплексных руд) и Grt-Ms (III природный тип комплексных руд). При отсутствии необходимости выделения мусковита, обогащение всех руд месторождения может вестись по принципиальной схеме, представленной на рис. 6.3.1. с получением гранатового концентрата. Техническая характеристика концентрата показывает высокое содержание граната (более 90%), параметры микротвердости и плотности соответствуют промышленным критериям (таблица 6.3.1).

Таким образом, на месторождении «Высота-181» выявлены три природных типа комплексных руд и два основных типа технологических комплексных руд, имеющих оптимальную универсальную схему обогащения и варианты упрощения схемы для выделения отдельных продуктов.

Для площади подсчета, получены следующие значения массы граната, кианита, ставролита и мусковита для рассчитанных объемов (по горной массе):

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.

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 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.
2. Месторождение «Высота-181» расположено в пределах южного крыла структуры и приурочено к осадочно-вулканогенной СТА, подобно месторождениям северного крыла. Отличительными чертами месторождения является малая мощность элементов разреза, более сложная, коллажированная структура и интенсивная базификация пород.
3. Главными факторами контроля руд можно считать литологические особенности вмещающих пород и метасоматоз кислотных и основных фаций, приводящий к формированию Grt-St-Ky-Ms-Qtz и Grt-Ms-Qtz метасоматитов, занимающих более половины объема всех оруденелых пород месторождения.
4. В пределах месторождения выделено три природных типа гранатовых руд метаморфического и метасоматического генезиса, отличающихся по составу, зональности, парагенетическим ассоциациям с другими минералами.
5. На основании анализа разновидностей комплексных руд выявлены и описаны три природных 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.
6. Выделены два технологических типа комплексных руд: 1. 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). 2. 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.

7. 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. тонн 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aranovich, L.Y. & Berman, R.G. Optimized standard state and solution properties of minerals. II. Comparisons, predictions, and applications. // Contributions to Mineralogy and Petrology, 1996, 126, N1/2, 25-37.
2. Baumgartner, R, Dusci, M, Trueman, A, Poos, S and Brittan, M, 2013. Building a geometallurgical model for the Canahuire epithermal Au-Cu-Ag deposit, Peru –past, present and future, in Proceedings International Geometallurgy Conference, pp 51-57.
3. Berman, R.G. and Aranovich, L.Y. Optimized standard state and solution properties of minerals: I. Model calibration for olivine, orthopyroxene, cordierite, garnet, and ilmenite in the system FeO-MgO-CaO-Al₂O₃-TiO₂-SiO₂. // Contributions to Mineralogy and Petrology, 1996, 126, 1–22.
4. Bushmin, S.A., Glebovitsky, V.A. Scheme of mineral facies of metamorphic rocks and its application to the fennoscandian shield with representative sites of orogenic gold mineralization. // Труды Карельского Научного Центра Российской Академии Наук. №2, 2016. - С. 3-27. ISSN 1997-3217.
5. Buchert, M., Schüler, D. & Beher, D. Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential. Öko-Institute.V., Freiburg. United Nations Environment Programme, Paris, 2009. 82 p.
6. Campbell T., McCuaig and. Hronsky J. M. A. The Mineral System Concept: The Key to Exploration Targeting // Society of Economic Geologists, Inc. Special Publication 2014. V. 18, P. 153–175.
7. Czarnota, Karol; Duan, Jingming; Taylor, David; Chopping, Richard. Mapping metasomatised mantle by integrating magnetotelluric, passive seismic and geochemical datasets – SE Australia. ASEG Extended Abstracts. - 2018. - 1-3.
8. Dobby G., Bennett C., Kosick G., Advances in SAG circuit design and

- simulation applied to the mine block model. Proc/ of the Intern/ conference on autogenous and semiautogenous grinding technology. British Columbia, Vancouver, 2001. Vol. 4. Pp. 244-263.
9. Dominy S.C., O'Connor L.O.. Geometallurgy - beyond conception // Volume: Proceedings Geometallurgy 2016, The AusIMM, pp 3-10.
 10. Ehrig K., McPhie J., Kamenetsky V. Geology and mineralogical zonation of the Olympic Dam iron oxide Cu-U-Au-Ag deposit, South Australia // Society of Economic Geologists, Inc. Special Publication 16 Geology and genesis of major copper deposits and districts of the world: a tribute to Richard H.Sillitoe. 2012. - pp. 237-267.
 11. Geusic, J. E.; Marcos, H. M.; Van Uitert, L. G. Laser oscillations in nd-doped yttrium aluminum, yttrium gallium and gadolinium garnets. *Applied Physics Letters*. **4** (10), 1964: pp 182-185. doi:10.1063/1.1753928.
 12. Glass H.J. Geometallurgy – Driving Innovation in the Mining Value Chain, Geomet 2016, Perth, Australia, 15th - 16th Jun 2016, Proceedings GeoMet 2016 – the third AusIMM international geometallurgy conference, 2016. pp 21-28.
 13. Harben P. The Industrial Minerals Handy Book. London, 1995. 253 p.
 14. Kretz, R., Symbols for rock-forming minerals. // *American Mineralogist*, v.68, 1983, p.277-279.
 15. Kuzvart M. Industrial minerals and rocks in the 21st Century / Utilización de rocas y minerales industriales. 2006. 287-303.
 16. Novotna N.; Pietra P.; Jurabek P. Distinct metasomatic events and their relation to a crustal-scale deformation zone (Gemer-Vepor Contact Zone, Central Western Carpathians). *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 17, EGU2015-646, 2015.

17. Mineral commodity summaries 2020, U.S. Geological Survey, 200 p., <https://doi.org/10.3133/70202434>. 2020
18. Moore, P. Garnet joins the jet set / *Industrial Minerals*, no. 462, 2006, pp 36–41.
19. Precambrian industrial minerals of Karelia / editor V. Shchiptsov. – Petrozavodsk: Poliprint Ltd, 1993. - 83 p.
20. Rappale, R.R. Garnet, in Kogel // J.E., Trivedi, N.C., Barker, J.M., and Krukowski, S.T., eds., *Industrial minerals and rocks (7th ed.)*: Littleton, CO, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2006. pp 475–480.
21. Samsonov A.V. et al. The relationship between adakitic, calc-alkaline volcanic rocks and TTGs: implications for the tectonic setting of the Karelian greenstone belts, Baltic Shield. // *Lithos* (79). 2005. pp 83-106.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.051>
22. Silva C. M., Sørensen B. E., Aasly K., Ellefmo S. L. Geometallurgical approach to the element-to-mineral conversion for the Nabbaren Nepheline Syenite Deposit // *Minerals* 2018, 8, 325, pp 1-20.
<https://doi.org/10.3390/min8080325>
23. Shchipansky A. A., Samsonov A. V., Bogina M. M. et. al. 2.8 Ga supra-subduction zone ophiolites of the Khizovara structure, North Karelia: The first known occurrence of Archaean rocks having boninitic affinities // *Abstr. 3 Eurorobe-Svekalapko Workshop*. Repino, Russia, 1998. pp 58-59.
24. Shchipansky A. A., Samsonov A. V., Bibikova E. V. et. al. 2.8 Ga boninite-hosting partial suprasubduction ophiolite sequences from the North Karelian greenstone belt, NE Baltic Shield, Russia // *Precambrian Ophiolites and Related Rocks*. Eds.: Kusky T., Veenstra V. and Condie K. Amsterdam: Elsevier, 2004. pp 425-487.

25. Shchiptsov V. V., Nikiforov A. G. Contribution of metasomatic processes to the formation of industrial minerals in the Khizovaara ore field. Republic of Karelia. Russia./ SGEM2016 Conference Proceedings. ISBN 978-619-7105-55-1 / ISSN 1314-2704. June 28 - July 6. 2016. Book1 Vol. 1. pp 125-132.
26. Thomas, C.L. Garnet, industrial // 2015 Minerals Yearbook. - U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2017. 32 p.
27. Thompson, A.R. A hydrothermal model for metasomatism of neoproterozoic Algoma-Type banded iron formation to massive hematite ore at the Soudan Mine, NE Minnesota. Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy. 2015. 84 p.
28. Thurston P.C., Kozhevnikov V.N. An Archean Quartzite-Andesite Association in the east Baltic Shield, Russia: Implication for Assemblage types and shield history // Prec.Research. V. 101, 2000, pp 313-340.
29. Азимов П. Я. Соотношение метасоматических образований и структурных элементов в зонах сдвиговых деформаций при метаморфизме: зона сочленения Беломорского подвижного пояса и Карельского кратона (Фенноскандинавский щит) // Материалы III тектонофизической конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле». Москва. 2012, с 146.
30. Азимов П. Я., Бушмин С. А. Растворимость минералов метаморфических и метасоматических пород в гидротермальных растворах разной кислотности: термодинамическое моделирование при 400-800 °С и 1-5 кбар. // Геохимия, №12, 2007, С. 1305-1330.
31. Азимов П. Я., Бушмин С. А., Львов С. Н., Доливо-Добровольский Д. В. Поведение минералов метаморфических и метасоматических пород в надкритических водных и водно-солевых растворах. // ДАН, 2007, т. 413, № 1, с 75-77.

32. Баранов В.Ф. Обзор мировых достижений и проектов рудоподготовки новейших зарубежных фабрик. // Обогащение руд. 2008. – №1. С. 8-12.
33. Бархатов А.В., Шеков В.А. Основы стоимостной оценки минерально-сырьевых ресурсов Карелии. Петрозаводск. 2002. 334 с.
34. Бетехтин А. Г. Курс минералогии, под научн. ред. Б.И. Пирогова и Б.Б. Шкурского. М., 2008. 330 с.
35. Бибикова Е. В., Самсонов А. В., Щипанский А. А. и др. Хизоваарская структура Северо-Карельского зеленокаменного пояса как аккретированная островная дуга позднего архея: изотопно-геохронологические и петрологические данные. // Петрология, 2003, Т. 11, № 3, с. 289–320.
36. Борисов П. А., Вологовская Н. А. Хизоварское месторождение кианита в КФ ССР. // Сов. Геология, 1941, № 6.
37. Бубнова Т. П., Гаранжа А. В., Скамницкая Л. С. Технологическая минералогия ставролитовых сланцев Палкъярвинской свиты (Северное Приладожье) // Материалы XI Съезда Российского минералогического общества. СПб. 2010. ISBN: 978-5-98709-245-3. С 313-315.
38. Буканов В. В. Цветные камни / Энциклопедия. - Санкт-Петербург, 2008. - 416 с. с ил.
39. Булах А. Г., Кривовичев В. Г., Золотарев А. А., Общая минералогия // 4-е издание, перераб и доп. – М: Издательский центр «Академия», 2008. – 416 с.
40. Бушмин С. А. Фации, фациальные серии метасоматоза и рудная специализация метаморфических поясов // Метасоматиты докембрия и их рудоносность, М. Наука, 1989. 215 с.

41. Бушмин С. А. Метасоматиты месторождения Хизоваара (Северная Карелия). // Изв. АН СССР. Сер. Геол., 1978. №7, С.127-138.
42. Бушмин С. А., Глебовицкий В. А. Схема минеральных фаций метаморфических пород. // Записки Российского минералогического общества. 2008. Том СXXXVII, № 2. с 1-13.
43. Володичев О. И., Глебовицкий В. А. Беломорский комплекс Карелии: Геология и петрология. Наука. Ленингр. отд., 1990. 248 с.
44. Володичев О. И., Король Н. Е., Кузенко Т. И., Сибелев О. С. Метаморфизм раннедокембрийских комплексов восточной части Фенноскандинавского щита // Геология Карелии от архея до наших дней. Петрозаводск: КарНЦ РАН. с. 49-55
45. Волотовская Н. А. Минералогия Хизоваарского месторождения кианита Карело-Кольской ССР (за экспедиционный период 1946 г) – Известия Карело-финской научно-исследовательской базы АН СССР, М., 1947.
46. Волотовская Н. А., Жиров К. К. Хромсодержащие минералы свиты Хизоваара. – Известия Карело-финской научно-исследовательской базы АН СССР, М., 1948.
47. Геологическая съемка метаморфических и метасоматических комплексов. Методическое пособие. Спб.: изд. ВСЕГЕИ, 1996. 412 с.
48. Геология карелид Карелии - Москва; Ленинград : Изд-во Акад. наук СССР., 1963. 265 с.
49. Геология СССР / гл. ред. А.В. Сидоренко. - Москва : Недра, 1971 - . Т. 37, ч. 1: Карельская АССР : геологическое описание / Ред. К.О. Кратц. - 1960. - 630 с.

- 50.Гилярова М. А. Стратиграфия и структура района Кукаозеро-Тикшеозеро-Хизовара // Вестник ЛГУ. Сер. Геол. 1969. Вып. 1. с. 73-85.
- 51.Глебовицкий В. А., Бушмин С. А. Метаморфический контроль рудных месторождений (на основе новой карты метаморфизма Карело-Кольского региона). // Материалы Всероссийской конференции «Минерагения докембрия», Петрозаводск, 2009, 49-50.
- 52.Глебовицкий В. А., Бушмин С. А. Послемигматитовый метасоматоз. - Л.: «Наука», 1983. - 216 с.
- 53.Голева Р.В. Гидротермалиты - ведущий поисковый признак на слабопроявленное оруденение и пути расширения МСБ ЦЭР // Рациональное освоение недр, 2013. № 3. - С. 24-37.
- 54.Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000, издание третье, серия Балтийская, Q-(35)-36 – Апатиты. Под ред. Ю. Б. Богданова – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012. 436 с.
- 55.Гранатовые руды Карелии/ В. В. Щипцов, Т. П. Бубнова, Л. С. Скамницкая и др. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2009. - 208 с.
- 56.Граменицкий Е. Н., Котельников А. Р., Батанова А. М., Щекина Т. И., Плечов П. Ю., // учебник по экспериментальной и технической петрологии // Научный мир, Москва, 2000 г., 416 стр., УДК: 549.08:552.08, ISBN: 5-89176-120-3
- 57.Гродницкий Л. Л., Сибелев О. С. Позднесвекофеннский этап регионального метаморфизма, метасоматоза, пегматито- и рудообразования на территории Карелии и юго-западной части Кольского полуострова // Зап. ВМО, 1995, №3, стр 26-32.

58. Данилевская Л.А., Скамницкая Л.С. Мусковитовые метасоматиты месторождения Восточная Хизоваара как нетрадиционный источник кварцевого сырья // Разведка и охрана недр, 2012. №6. - С. 60–65.
59. Добрецов Н. Л. Метаморфические формации и метаморфогенные месторождения. ИГиГ СО АН СССР, Новосибирск. 1981. 80 с.
60. Доливо-Добровольский Д.В. Компьютерная программа TWQ_Comb. URL: <http://www.dimadd.ru/ru/Programs/twqcomb24>.
61. Доливо-Добровольский Д.В. Компьютерная программа TWQ_View. URL: <http://www.dimadd.ru/ru/Programs/twqview25>.
62. Доливо-Добровольский Д.В. Компьютерная программа TC_Comb. URL: <http://dimadd.ru/ru/Programs/tccomb>
63. Доливо-Добровольский Д.В. Компьютерная программа PTQuick. URL: <http://dimadd.ru/ru/Programs/ptquick>
64. Заверткин А.С., Щипцов В.В., Ененко В.П. Возможности применения в производстве огнеупоров кианитов Хизоваарского месторождения // Новые огнеупоры. 2005, №4. - С.87-92.
65. Иващенко В.И., Голубев А.И. Золото и платина Карелии: формационно-генетические типы оруденения и перспективы. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 369 с.
66. Изоитко В.М. Технологическая минералогия и оценка руд. - Наука, Санкт-Петербург, 1997. - 581 с.
67. Кварцевое сырье Карелии / Данилевская Л.А., Скамницкая Л.С. Щипцов В.В. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 226 с.
68. Кианитовые руды России / В.Н. Огородников, В.А. Коротеев, Ю.Л. Войтеховский и [др.]. - Екатеринбург: УрО РАН, 2012. - 334 с.

69. Колодяжный С. Ю. Структурно-кинематическая эволюция Карельского массива и Беломорско-Лапландского пояса в палеопротерозое: Балтийский щит. дисс. на соиск.уч.степ. докт. геол.-мин. наук. Москва. 2004. 434 с.
70. Кожевников В. Н. Геология и геохимия архейских северокарельских зеленокаменных структур. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 1992. 99 с.
71. Кожевников В. Н. Аномальные геохимические ассоциации в Хизоваарской верхнеархейской зеленокаменной структуре, Северная Карелия // Очерки геологии докембрия Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1995. с 14-28.
72. Кожевников В. Н. Архейские зеленокаменные пояса Карельского кратона как аккреционные орогены. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. 223 с.
73. Кожевников, В. Н. , Самсонов А. В., Щипанский А. А. Архейский Хизоваарский зеленокаменный пояс в районе оз. Верхнее: общие черты геологического строения и эволюции // Беломорский подвижный пояс и его аналоги: геология, геохронология, геодинамика, минерагения. - Петрозаводск, 2005, с. 31-52.
74. Кожевников В.Н., Щипанский А.А. Неоархейский Хизоваарский зеленокаменный комплекс в районе оз. Верхнее // Путеводитель геологической экскурсии для 33МГК, 2008.
75. Кориневский Е. В. Ставролитовые сланцы окрестностей Кондравы (Южный Урал) // Известия Челябинского научного центра УрО РАН, № 1, 1998. с. 71-80.
76. Коротеев В.А., Огородников В.Н. и др. "Небокситовое алюминиевое сырье России" УрО РАН, Екатеринбург, 2011, 230 с.

77. Корсакова М. А., Иванов Н. М., Дударева Г. А. Объяснительная записка к Государственной геологической карте Российской Федерации масштаба 1:2000000 Q-36-XXI-XXII / Севзапгеология. – СПб, 2000 - 194 с.
78. Коржинский Д. С. Теоретические основы анализа парагенезисов минералов. М. Наука, 1973 - 288 с.
79. Краткий физико-технический справочник. Т.1 / Под общ. ред. К.П. Яковлева. М.: ФИЗМАТГИЗ. 1960. – 446 с.
80. Кратц, К. О. Геология карелид Карелии. - Москва; Ленинград : Изд-во Акад. наук СССР. [Ленингр. отд-ние], 1963. - 210 с.
81. Кривонос В. П. и др. Новая сырьевая база ставролита на Украине // Разведка и охрана недр. 1987. №12, с. 28-32.
82. Кужварт М. Неметаллические полезные ископаемые. М. 1986, с. 12-13
83. Кулешевич Л. В., Слюсарев В. Д. Геологическое строение Кукасозерско-Тикшезерской структурной зоны. // Вопросы геологии и магматизма Карелии, Петрозаводск. 1992, с. 16-21.
84. Левченко Е.Н. Минеральные ассоциации редкометалльно-титановых песков месторождения "Центральное" и пространственная изменчивость свойств рудных минералов // Методы оценки технологических свойств минералов и их поведение в технологических процессах. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. - С. 78-92
85. Логвиненко Н. В. Петрография осадочных пород (с основами методики исследования). – М. 1967 - 416 стр.
86. Материаловедение / Ю.Т. Чумаченко, Г.В. Чумаченко. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 320 с.

87. Материалы по полевым шпатам и гранатам Карелии - Material on the feldspars and garnets of Karelia / под. ред. П. А. Борисова, И.Н. Шпильберга; Карельский научно-исследовательский институт, секция естественных производительных сил. -Петрозаводск : Карельский научно-исследовательский институт, 1935. -150 с.
88. Металлогения Карелии // отв.ред. С.И.Рыбаков, А.И.Голубев. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. 340 с.
89. Метасоматоз и метасоматические породы / В.А. Жариков, В.Л.Русинов, А.А. Маракушев и др. - М.: Научный мир, 1998. - 492 с.
90. Минеральное сырье Лоухского района. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 1991. 192 с.
91. Миясиро А. Метаморфизм и метаморфические пояса. М. «Мир». 1976. 535 с.
92. Микитюк М. А. Исследование пространственного распределения ставролита в продуктивных горизонтах Осипенковской площади в связи с оценкой её перспективности. Выпускная квалификационная работа магистра. ДонГУ. 2013
93. Минерально-сырьевая база Республики Карелия / отв. ред. В.П.Михайлов, В.Н.Аминов. – Петрозаводск: Карелия, 2006. - Т.2. - 356 с.
94. Московченко Н. И., Турченко С. И. Метаморфизм кианит-силлиманитового типа и сульфидное оруденение: Северная Карелия. Наука, 1975. 138 с.
95. Мусковитовые кварциты Карелии - новый промышленный тип слюдяного сырья. Щипцов В.В. Скамницкая Л.С., Бубнова Т.П., Данилевская Л.А., Родионов В.С. // Геология и полезные ископаемые Карелии: Вып. 6, Петрозаводск: изд. КарНЦ РАН, 2003. - С. 67-77.

96. Наумов Г. Б., Миронова О. Ф. Гидротермальные флюиды: термобарические параметры и их роль в процессе рудообразования // Записки РМО, №3, 2009. с. 56-69.
97. Нерадовский Ю.Н., Войтеховский Ю.Л., Карпов С.М. Новые данные о технологических свойствах кианитовых руд Кейв. // Технологическая минералогия, методы переработки минерального сырья и новые материалы. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. С. 55-65
98. 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.
99. Никифоров А. Г. Корреляция результатов минералого-технологического картирования с геологическими условиями высота-181 // сб.ст. IX Российского семинара по технологической минералогии, Магнитогорск. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015.
100. Никифоров А.Г. Рудная минерализация южного крыла Хизоваарской структуры // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2018. № 11. С 134-140.
101. Огородников В. Н., Коротеев В. А., Поленов Ю. А., Бабенко В. В., Савичев А. Н. Золоторудная, редкометальная и хрусталенносная минерализации месторождений Урала кварцево-жильного типа / Екатеринбург; УрО РАН - УГГУ, 2014; ISBN 978-5-8019-0334-7. - 310 с
102. Петров С. И. К вопросу о генезисе региональных метасоматитов Юго-восточной части зоны Колмозеро – Воронья // // Метаморфизм и метаморфоген. рудообраз. ран. докембрия. - Апатиты, 1984. - С. 47-53

103. Перчук Л. Л., Геотермобарометрия и перемещения кристаллических пород в коре и верхней мантии Земли // Соросовский обр. журнал №7, 1997.
104. Перчук Л. Л., Рябчиков И. Д. Фазовое соответствие в минеральных системах. М. Недра, 1976.
105. Петров С.В., Мишулович П.М., Смоленский В.В. Принципы создания блочной геолого-технологической модели месторождения // Обогащение руд, 2010, №6. - С. 34-38
106. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Издание третье. СПб: Изд. ВСЕГЕИ, 2009. – 200 с.
107. Пешков А.А., Мацко Н.А. Доступность минерально-сырьевых ресурсов. – М: Наука, 2004. 280 с.
108. Прогнозно-минерагеническое изучение Республики Карелия в масштабе 1:1000000 с целью выявления объектов, перспективных на минеральное сырье для производства специальных кварцевых изделий (1995-2000) // Отчет Института геологии КарНЦ РАН. Рук. В.В. Щипцов, г. Петрозаводск, 2000
109. Проскурин Г. Ю. Метасоматиты Тикшеозерского зеленокаменного пояса. Автореферат канд.дисс. на соиск.уч.степ. канд. геол.-мин. наук. СПб. 2014. 22 с.
110. Проскурин Г. Ю. Метасоматиты зоны сочленения Карельской гранит-зеленокаменной области и Беломорского метаморфического пояса // Региональная геология и металлогения. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. N 56. - С. 51-57.

111. РД 153-39.0-047-00 Регламент по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей нефтяных и газонефтяных месторождений: РД 153-39.0-047-00: утв. и введен в действие Минтопэнерго России приказом № 63 от 10.03.2000
112. Родионов В. С. Отчет о результатах поисковых и разведочных работ по выявлению в районе Чупинской ПОФ маложелезистого чешуйчатого мусковита и чистого кварца для производства высокотехнологичных изделий и помола за 2000-2001 г.г., 2001.
113. Ручьев А. М. Благородные металлы в гнейсах чупинской свиты (беломорский комплекс, Северная Карелия). // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 5. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2002. С. 47–58
114. Ручьев А. М. Образование кианитовых гнейсов в тектонофизическом аспекте (беломорский комплекс пород Балтийского щита). // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 13. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. С. 13–27
115. Рыбаков С. И., Мельянцев Н. В. Хизоваарская палеовулканическая постройка // Геология докембрия Северной Карелии: Опер.-информ. Материалы. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1986. С 16-18.
116. Савко К. А. и др. Основные принципы создания легенды к карте метаморфизма докембрия Восточно-европейской платформы. // Вестник ВГУ, Серия: геология, 2008. т.2. с 82-91.
117. Савко К. А. Новая карта метаморфизма докембрия территории России масштаба 1:5000000 // Вестник ВГУ, Серия: геология, 2013. т.2. с. 5-18.

118. Савко К. А., Кальмуцкая Н. Ю. Фазовые равновесия и условия метаморфизма раннепротерозойских метапелитов Приоскольской структуры, Воронежский кристаллический массив // Вестник Воронежского университета. Сер. Геология. №9, 2000. с. 102-121.
119. Самсонов А. В., Бибикина Е. В., Щипанский А. А. и др. Геохронология и петрология Хизоваарской структуры, Северокарельский зеленокаменный пояс: стадийность формирования и геодинамические режимы // Изотопное датирование геологических процессов: новые методы и результаты. Тез. Докладов 1 Российской конференции по изотопной геолхронологии. М.: ГЕО, 2000. С 362-329.
120. Светов С.А., Степанова А.В., Чаженгина С.Ю., Светова Е.Н., Михайлова А.И., Рыбникова З.П., Парамонов А.С., Утицина В.Л., Колодей В.С., Эхова М.В. Прецизионный (ICP-MS, LA-ICP-MS) анализ состава горных пород и минералов: методика и оценка точности результатов на примере раннедокембрийских мафитовых комплексов// Труды КарНЦ РАН. № 7. 2015. С.54-73. DOI: 10.17076/geo140
121. Сергеев С. А., Лобач-Жученко С. Б. Возраст Фукситовых метасоматитов Хизоваары (Северная Карелия) по результатам U-Pb датирования единичных зерен циркона. // ДАН. Т. 333, № 1. 1993. с.73-76.
122. Скамницкая Л.С., Бубнова Т.П., Щипцов В.В., Инина И.С. Изучение вещественного состава мусковитсодержащих кварцитов с использованием современных методов анализа вещества // Методы оценки технологических свойств минералов и их поведение в технологических процессах, Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 117-123.
123. Скамницкая Л.С., Данилевская Л.А., Бубнова Т.П., Щипцов В.В. Разработка новых подходов к технологиям комплексного освоения месторождений мелкогабаритного мусковита (на примере месторождения

- Восточная Хизоваара) // Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья. Материалы международного совещания «Плаксинские чтения-2012». Петрозаводск - КарНЦ РАН, 2012. - С. 276-279
124. Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья // Под ред. В.А.Чантурия и В.В.Щипцова. Мат.межд.совещания. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 398 с.
125. Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения – 2017): материалы Междунар. науч. конф., Красноярск, 2017. 452 с.
126. Создание и использование постоянно действующей геолого–технологической модели 3 блока Березовской площади / А.Р. Рахманов, Р.Р. Ибатуллин, О.Г. Антонов // Нефтяное Хозяйство. –2012. –№ 2. –С. –54–56
127. Соколов Ю. М., Бушмин С. А. Пегматитизация и метасоматоз кианит-андалузит-силлиманитовой фациальной серии. Л: «Наука». 1978. 88 с.
128. Слабунов А. И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. - 296 с
129. Стратиграфия докембрия Карельской АССР (архей, нижний протерозой) / Отв. Ред. Соколов В. А. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1984. 115 с.

130. Сыртланов, В.Р. Некоторые аспекты геолого–гидродинамического моделирования крупных месторождений для проектирования и мониторинга разработки / В.Р. Сыртланов, Н.И. Денисова, Ф.С. Хисматуллина // Нефтяное хозяйство. –2007. –№5. –С. 70–74
131. Сыстра Ю.И., Скорнякова Н.И. Деформации лопийских образований района Хизоваара оз. Кереть (Северная Карелия). // Структурный анализ кристаллических комплексов, тезисы докладов. М., 1986. с. 70-72.
132. Термо- и барометрия метаморфических пород. Отв. редактор Глебовицкий В. А. Л. Наука. 1977. 207 с., УДК: 549.6:536.7
133. Тогизов К. С. Исследование рудоконтролирующих факторов Сырымбетского рудного поля в цифровом 3D формате и оценка его потенциальных ресурсов (с применением ГИС технологии и данных ДЗЗ) // диссертация на соискание... 2018. 104 с.
134. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р.,Викторов С.Д., Рыльникова М.Н., Радченко Д.Н. Научное обоснование технологий комплексного ресурсосберегающего освоения месторождений стратегического минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), № 6. С. 5-12
135. Фации метаморфизма восточной части Балтийского щита / ред. Глебовицкий В. А. – Л., 1990. – 144 с.
136. Харитонов Л. Я. Структура и стратиграфия карелид восточной части Балтийского щита. М: 1966. 360 с.
137. Хизоваарское кианитовое поле (Северная Карелия). Щипцов В. В. и др. КФАН СССР, Петрозаводск: КарНЦ РАН. 1988. 105 с.

138. Хисамов, Р.С. Моделирование разработки нефтяных месторождений / Р.С. Хисамов, А.В. Насыбуллин –М.: ВНИИОЭНГ, 2008. –255 с.
139. Чантурия В.А., Козлов А.П. Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения – 2017) Красноярск: 2017. С. 3-6
140. Шаталов Е.Т. Термины, относящиеся к общим определениям металлогении, металлогеническому районированию и металлогеническим картам. Обзор геологических понятий и терминов в применении к металлогении. М.: АН СССР, 1963. С. 7-25.
141. Щипанский А. А., Самсонов А. В., Богина М. М. и др. Высокомагнезиальные, низкотитанистые кварцевые амфиболиты Хизоваарского зеленокаменного пояса Северной Карелии – архейские метаморфизованные аналоги бонинитов // ДАН. 1999. Т. 365, № 6. С. 817-820.
142. Щипцов В. В. Технологическая минералогия промышленных минералов Карелии// Минералогия, петрология и минерогения докембрийских комплексов Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. с. 119–123.
143. Щипцов В.В. Технолого-минералогическая оценка промышленных минералов Карелии // Мат. годичного собр. РМО «Современные методы минералого-геохимических исследований как основа выявления новых типов руд и технологии их комплексного освоения». СПб, 2006. – с .80-83.

144. Щипцов В.В., Бубнова Т.П., Скамницкая Л.С., Никифоров А.Г. Оценка влияния метаморфогенно-метасоматических процессов на качество промышленных минералов // сборник «Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья» (Плаксинские чтения – 2013). – Томск: ТПУ, 2013. С. 213-215.
145. Щипцов В.В., Данилевская Л.А., Гаранжа А.В., Родионов В.С. Прогнозно-минерагеническая оценка кварценосности Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. – Петрозаводск: изд. КарНЦ РАН, 2001. – Вып. 4 – С. 71-79.
146. Щипцов В.В., Бубнова Т.П., Гаранжа А.В., Данилевская Л.А., Скамницкая Л.С., Хазов Р.А., Ильина В.П., Лебедева Г.А., Фролов П.В., Щипцова Н.И. Оценка потенциала промышленных минералов карелии: шаг за шагом // Геология Карелии от архея до наших дней. Материалы докладов Всероссийской конференции, посвященной 50-летию Института геологии Карельского научного центра РАН. Петрозаводск, 24–26 мая 2011 года. Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 2011. С. 161-171.
147. Щипцов В.В., Скамницкая Л.С., Каменева Е.Е., Савицкий А.И. Гранатовые руды северной Карелии, технологические подходы к их освоению и возможные области использования // Геология и полезные ископаемые. Петрозаводск, 2002, вып. 5. – С.82-91.

СПИСОК ПЕЧАТНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

Никифоров А.Г. Факторы контроля комплексных гранатовых руд месторождения «Высота-181» // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2017. № 11. С. 43-58.

Никифоров А.Г. Рудная минерализация южного крыла Хизоваарской структуры // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2018. № 11. С. 134-140.

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.

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:

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

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.

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.

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.

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.

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, pp 1167-1174.

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, pp 233-240.

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, pp 125-132.

Никифоров А. Г. Механизм формирования комплексных гранатовых руд проявления «Высота-181» метаморфогенно-метасоматической и

метасоматической формации // Доклады XIII Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле». Т. 1. М: МГРИ-РГГРУ, 2017. С. 231-232.

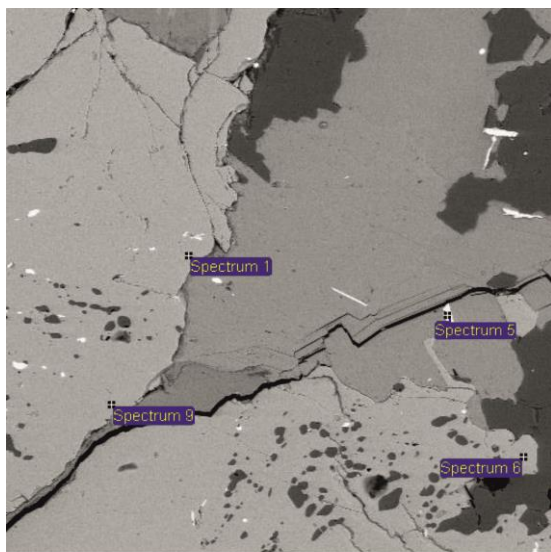
Nikiforov A. Metamorphic and metasomatic ore control of Khizovaara structure deposits. // SGEM2018 GeoConference Proceedings. STEP 92 Technology Ltd, 51 “Alexander Malinov” Blvd, 1712 Sofia Bulgaria 2018, Vol. 1.1. pp 221-228.

Приложение 1. Таблицы, отражающие состав зон кристаллов граната из различных пород месторождения.

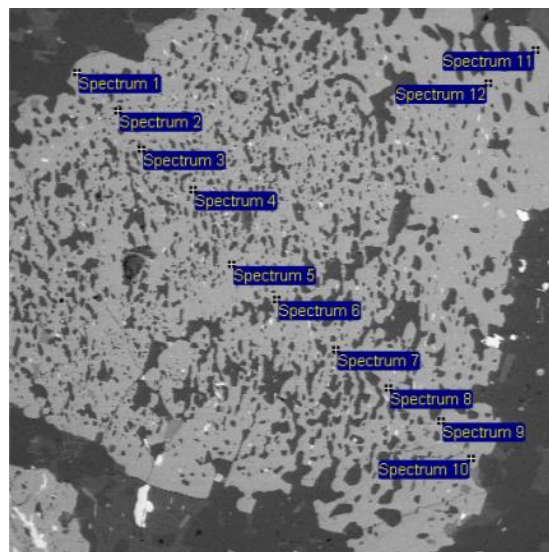
Исследования проводились с использованием СЭМ VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments) Аналитического Центра ФИЦ КарНЦ РАН.

Таблица 1. характеристика пород месторождения, вмещающих изученные гранаты soi – site of interest (область изучения в камере электронного микроскопа).

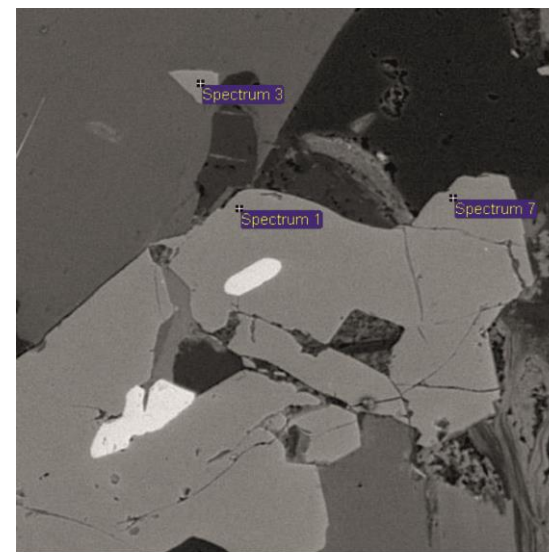
образец	soi	Название породы
1В-18	soi 6	Grт-Qtz-Bt-Ged метасоматит по амфибол-биотитовым гнейсам
1В-33	soi 2, 7	Grт-Qtz-Pl-Ky-Ms метасоматит по Grт-Bt гнейсам
1В-48	soi 1, 2, 5	Grт-Pl-Qtz-Am-Chl метасоматит по амфиболиту
1В-52	soi 1, 2	Grт-Qtz-St-Ms метасоматиты по Grт-Bt гнейсам
А4-В-1	soi 5	Grт-Amph-Pl-Qtz гранатовый амфиболит
Е-19-2	soi 2, 4	Grт-Qtz метасоматит тыловой зоны по Am-Bt гнейсу
Е-21	soi 1, 6	Grт-Am-Pl-Bt-Qtz-Cal неизменный Am-Bt гнейс
Е-10-В	soi 1	Grт-Pl-Qtz-Bt-Am-Ky метасоматит по Am-Bt гнейсам
Е-23-В-1	soi 7	Grт-Qtz-Ms-Ky-Pl-St-Chl метасоматит по Grт-Bt гнейсам
Е-24-1	soi 1, 5, 6	Grт-Bt-Qtz-Ky-Pl метасоматит передовой зоны по Grт-Bt гнейсу
Е-26-3	soi 2, 3, 4, 5, 8	Grт-Bt-St-Ms-Ky-Qtz-Pl метасоматит по Grт-Bt гнейсу
V13-11G	soi 2	Grт-Ms-Qtz-Pl метасоматит по Grт-Bt гнейсу
636	soi 5	Grт-Pl-Ms-Am-Ky-Qtz метасоматит по Am-Bt гнейсу



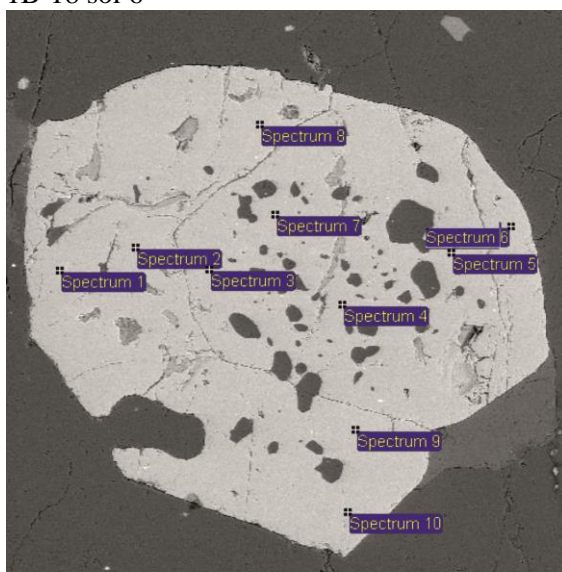
400µm
1B-18 soi 6



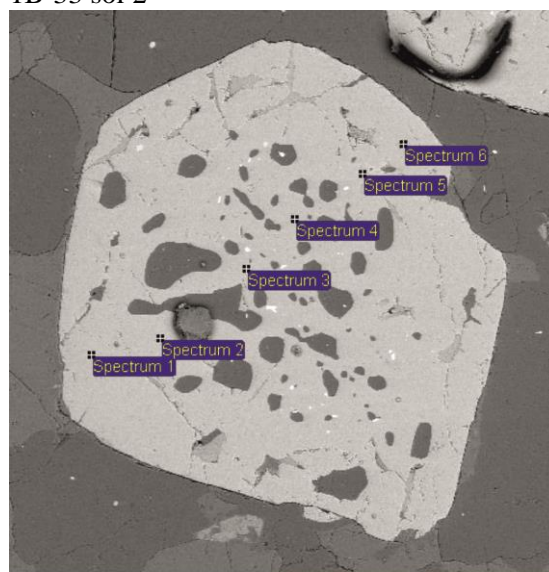
1mm
Electron Image 1
1B-33 soi 2



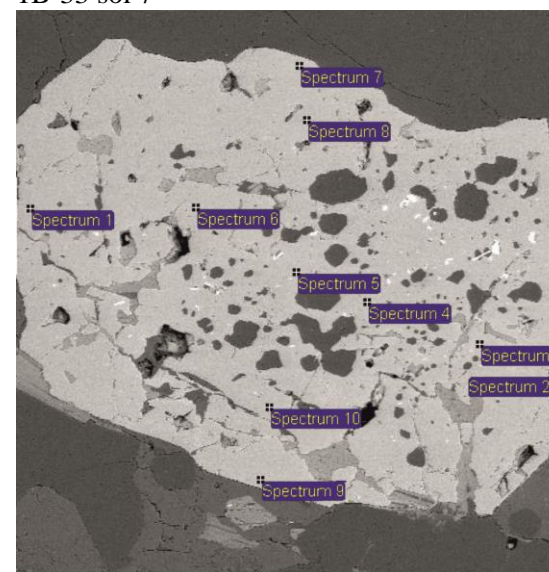
100µm
1B-33 soi 7



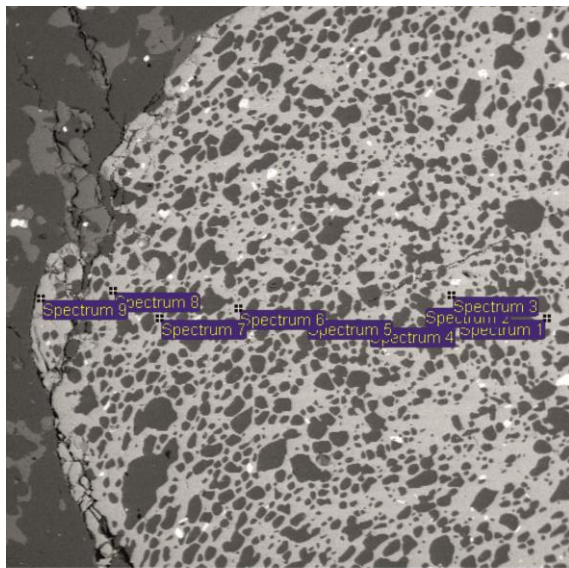
400µm
1B-48 soi 1



500µm
1B-48 soi 2

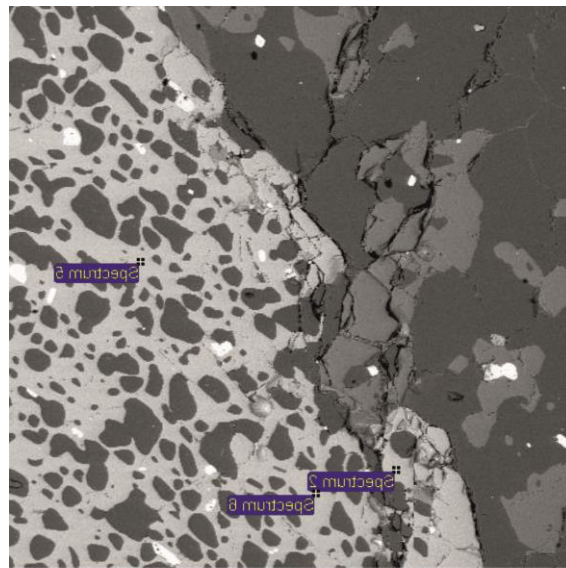


500µm
1B-48 soi 5



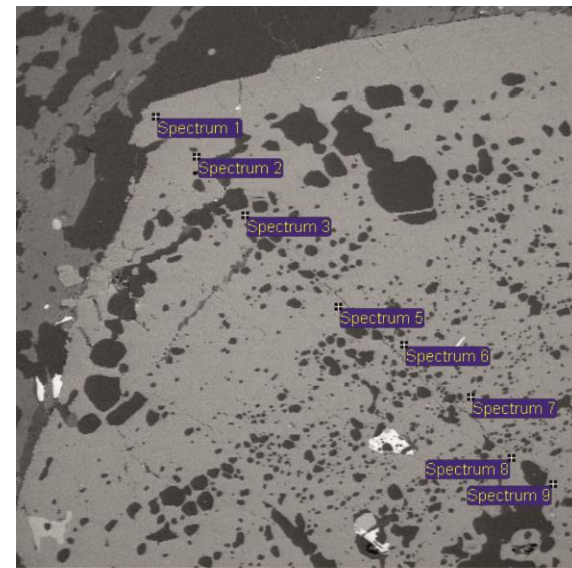
1B-52 soi 1

Electron Image 1



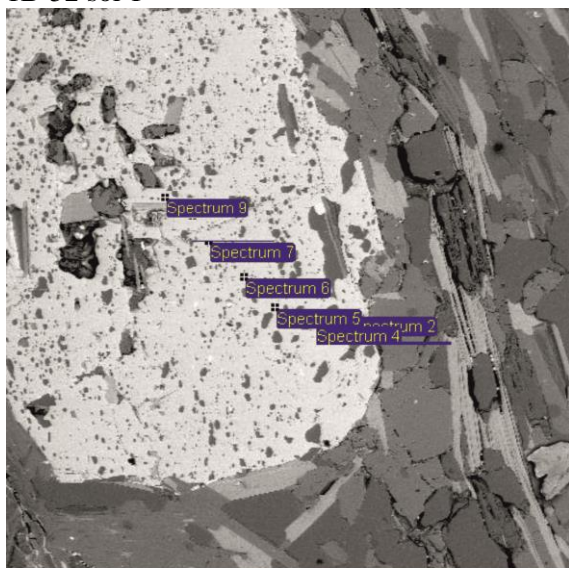
1B-52 soi 2

Electron Image 1



A4-B-1 soi 5

Electron Image 1



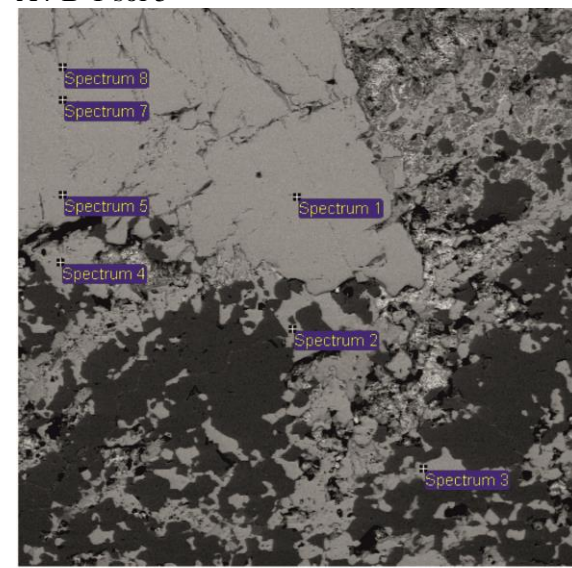
E-10-B soi 1

1mm



E-19-2 soi 2

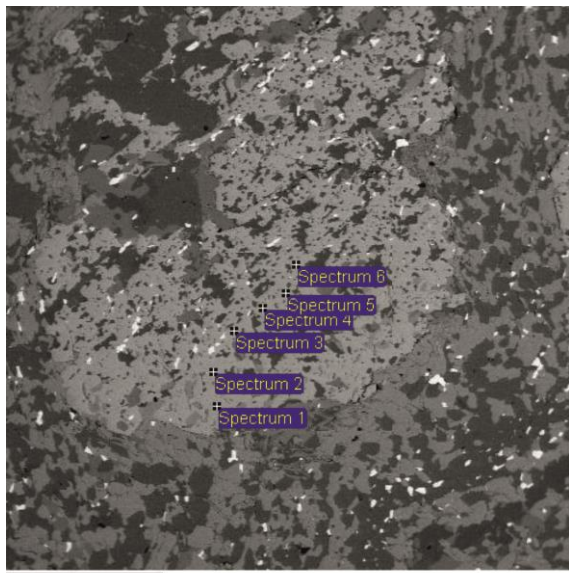
1mm



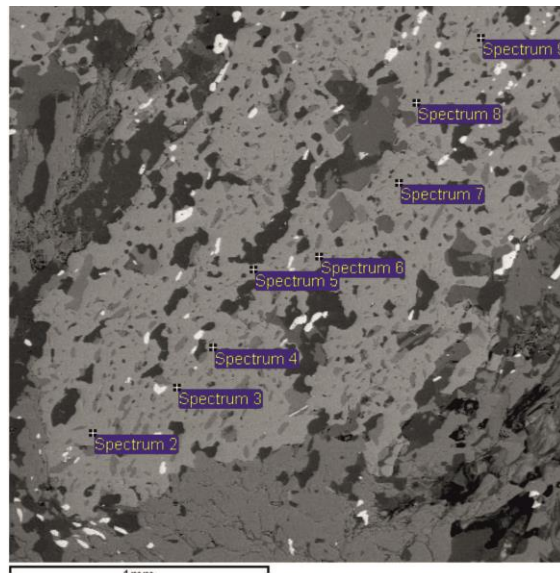
E-19-2 soi 4

900µm

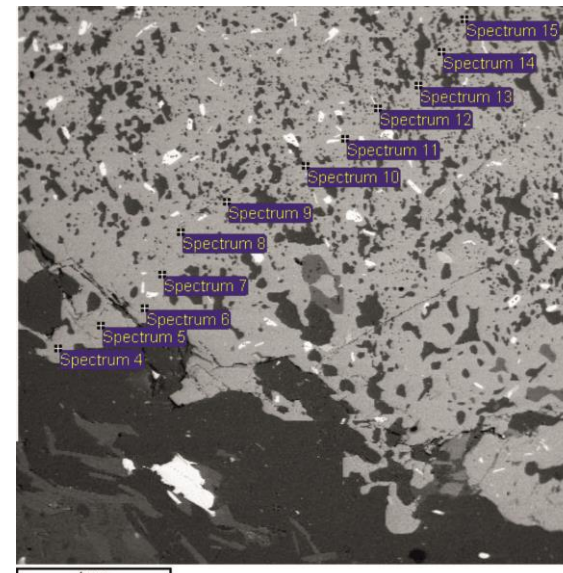
Electron Image 1



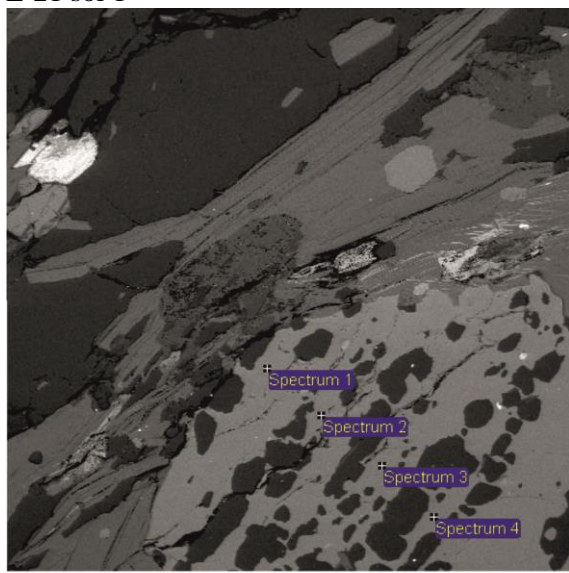
E-21 soi 1



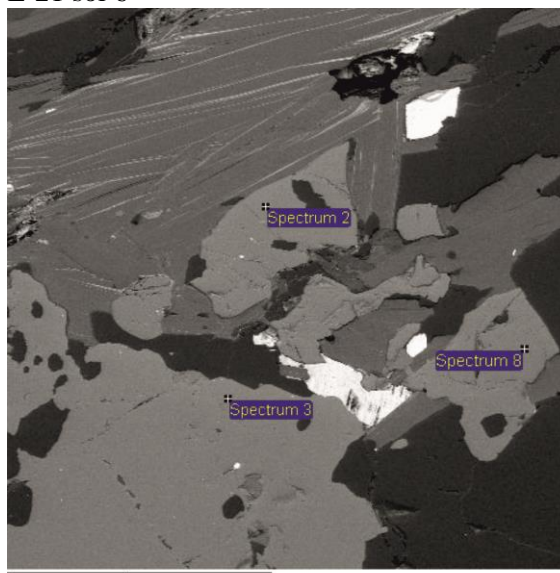
E-21 soi 6



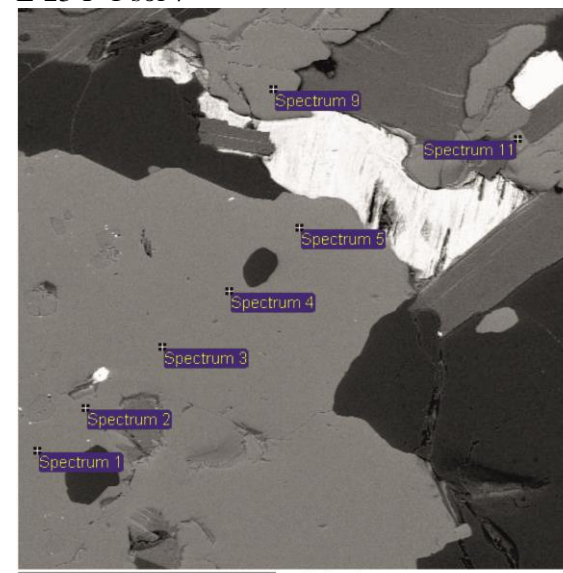
E-23-F-1 soi 7



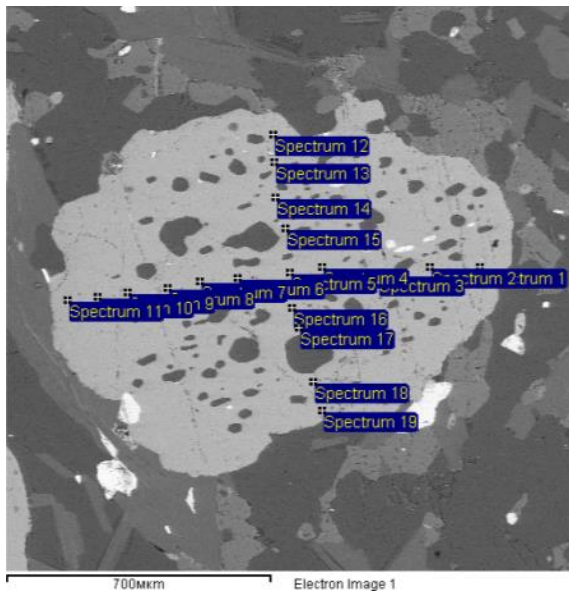
E-24-1 soi 1



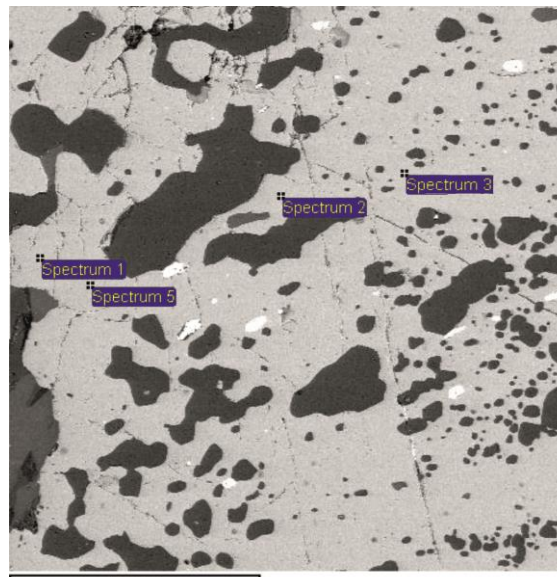
E-24-1 soi 5



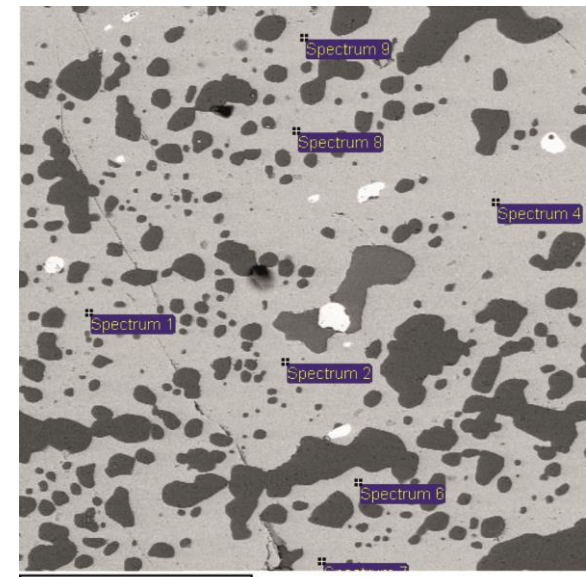
E-24-1 soi 6



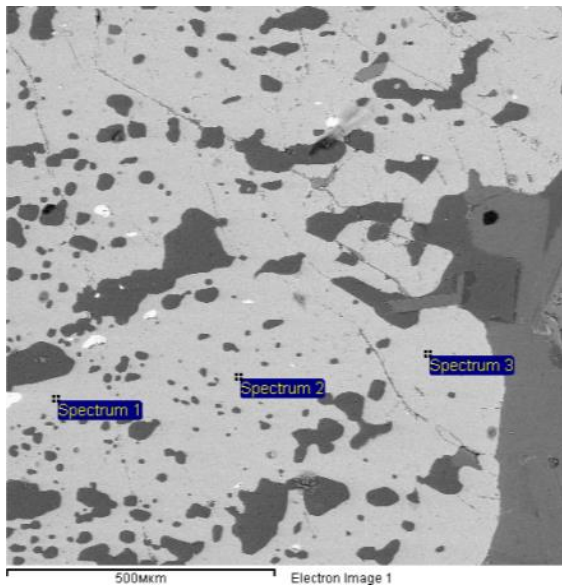
E-26-3 soi 2



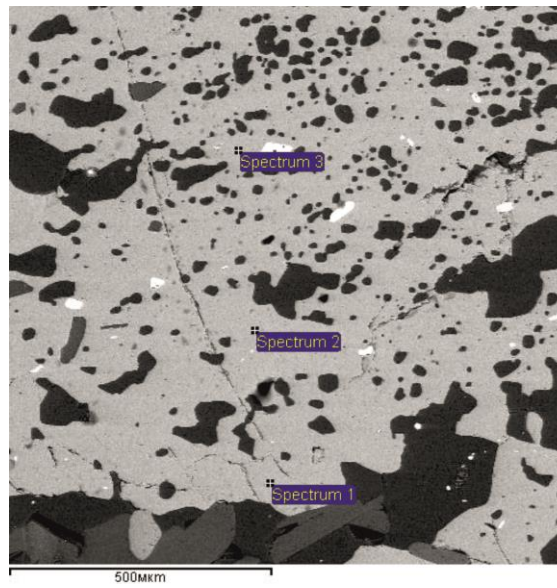
E-26-3 soi 3



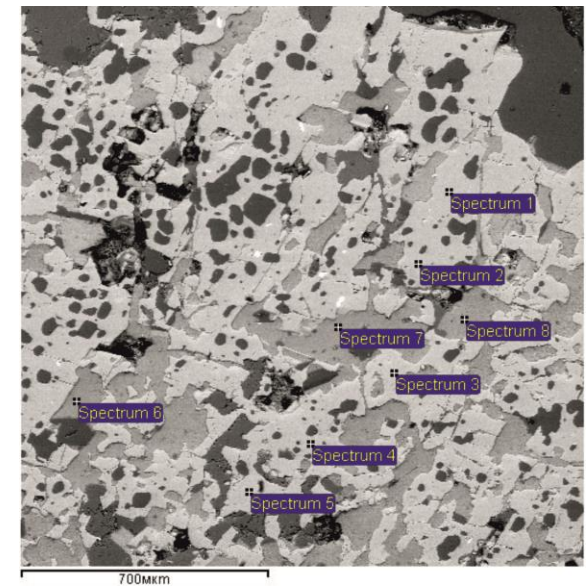
E-26-3 soi 4



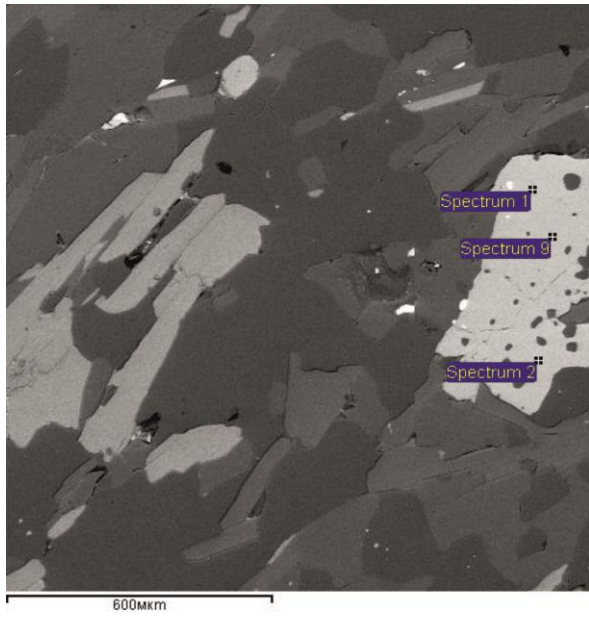
E-26-3 soi 5



E-26-3 soi 8



V13-11G soi 2



636 soi 5

образец	Спектр	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма	Пироп	Альмандин	Спессаргин	Анрадит	Гроссуляр	Уваровит	Ng	a0	X(Fe)	X(Mn)	X(Mg)	X(Ca)	X(Mg)/1- X(Mg)
IB-18 soi 6	1	34,82	19,94	38,90	0,00	2,11	4,22	99,99	9,03	77,98	0,00	2,42	10,57	0,00	1,77	11,28	0,78	0,09	0,10	0,00	0,13
	5	34,29	20,47	40,01	0,00	1,86	3,37	100,00	8,09	81,38	0,00	1,97	8,56	0,00	1,78	11,32	0,81	0,08	0,09	0,00	0,11
	6	35,27	20,03	38,98	0,00	2,18	3,53	99,99	9,21	80,06	0,00	1,67	9,05	0,00	1,78	11,36	0,80	0,09	0,10	0,00	0,11
	9	34,33	20,58	39,65	0,00	1,19	4,24	99,99	5,17	81,60	0,00	2,32	10,92	0,00	1,77	11,29	0,82	0,05	0,05	0,00	0,13
IB-33 soi 2	1	35,47	20,41	36,06	0,92	2,69	4,45	100,00	11,31	73,06	2,20	2,02	11,43	0,00	1,77	11,33	0,73	0,11	0,13	0,02	0,13
	2	35,44	20,20	35,89	1,29	2,65	4,53	100,00	11,15	72,07	3,08	2,17	11,53	0,00	1,77	11,31	0,72	0,11	0,13	0,03	0,14
	3	35,56	20,11	36,22	1,22	2,92	3,97	100,00	12,24	72,89	2,91	1,86	10,10	0,00	1,77	11,34	0,73	0,12	0,14	0,03	0,12
	4	35,66	20,40	36,23	0,96	2,95	3,81	100,01	12,33	73,94	2,28	1,61	9,84	0,00	1,78	11,37	0,74	0,12	0,14	0,02	0,11
	5	35,65	20,48	35,90	0,89	3,14	3,94	100,00	13,13	72,91	2,12	1,69	10,15	0,00	1,77	11,36	0,73	0,13	0,15	0,02	0,12
	6	35,55	20,75	36,03	0,95	2,87	3,86	100,01	12,04	74,07	2,26	1,57	10,07	0,00	1,78	11,37	0,74	0,12	0,14	0,02	0,12
	7	35,61	20,45	35,96	0,85	3,56	3,57	100,00	14,90	72,33	2,02	1,63	9,11	0,00	1,77	11,36	0,72	0,15	0,18	0,02	0,11
	8	36,10	20,58	35,61	0,93	3,28	3,49	99,99	13,55	73,92	2,18	1,17	9,19	0,00	1,78	11,41	0,74	0,14	0,16	0,02	0,10
	9	35,67	19,86	36,23	0,64	2,87	4,73	100,00	12,00	72,28	1,52	2,30	11,91	0,00	1,76	11,29	0,72	0,12	0,14	0,02	0,14
	10	35,47	20,13	35,99	0,93	3,36	4,12	100,00	14,12	71,21	2,22	2,11	10,34	0,00	1,76	11,31	0,71	0,14	0,16	0,02	0,12
	11	35,23	20,68	35,79	0,95	3,12	4,22	99,99	13,20	71,68	2,28	2,07	10,77	0,00	1,77	11,32	0,72	0,13	0,15	0,02	0,13
	12	35,66	20,63	35,07	0,73	3,40	4,50	99,99	14,21	70,53	1,73	1,98	11,54	0,00	1,77	11,33	0,71	0,14	0,17	0,02	0,14
IB-33 soi 7	1	35,39	20,25	37,19	1,51	2,20	3,47	100,01	9,27	76,61	3,61	1,50	9,00	0,00	1,78	11,38	0,77	0,09	0,10	0,04	0,11
	3	35,55	20,17	37,42	1,61	1,49	3,76	100,00	6,25	78,58	3,84	1,40	9,93	0,00	1,79	11,40	0,79	0,06	0,07	0,04	0,11
	7	35,65	20,05	37,31	1,24	1,68	4,08	100,01	7,03	77,77	2,95	1,57	10,69	0,00	1,78	11,38	0,78	0,07	0,08	0,03	0,12
IB-48 soi 1	1	36,46	20,87	31,13	1,01	4,18	6,35	100,00	17,09	61,90	2,35	2,30	16,36	0,00	1,75	11,30	0,62	0,17	0,21	0,02	0,19
	2	35,59	21,18	31,63	1,16	4,25	6,19	100,00	17,80	60,80	2,76	3,01	15,62	0,00	1,74	11,22	0,61	0,18	0,22	0,03	0,19
	3	36,42	21,19	31,13	1,28	4,09	5,89	100,00	16,74	62,95	2,98	1,92	15,41	0,00	1,76	11,35	0,63	0,17	0,20	0,03	0,17
	4	36,25	21,34	30,57	1,01	4,22	6,62	100,01	17,36	60,72	2,36	2,42	17,14	0,00	1,75	11,29	0,61	0,17	0,21	0,02	0,20
	5	36,52	20,45	30,86	1,34	4,31	6,53	100,01	17,59	60,14	3,11	2,64	16,52	0,00	1,75	11,27	0,60	0,18	0,21	0,03	0,19
	6	36,80	20,81	31,20	1,14	4,38	5,68	100,01	17,74	63,10	2,62	1,73	14,80	0,00	1,76	11,37	0,63	0,18	0,22	0,03	0,17
	8	36,72	20,94	31,15	1,08	4,64	5,46	99,99	18,84	62,74	2,49	1,73	14,20	0,00	1,76	11,36	0,63	0,19	0,23	0,03	0,16
	7	36,40	21,17	30,62	1,19	4,07	6,56	100,01	16,67	61,25	2,77	2,26	17,05	0,00	1,75	11,31	0,61	0,17	0,20	0,03	0,19

образец	Спектр	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма	Пироп	Альмандин	Спессаргин	Анрадит	Гроссуляр	Уваровит	Ng	a0	X(Fe)	X(Mn)	X(Mg)	X(Ca)	X(Mg)/1- X(Mg)
	9	37,07	20,50	31,03	1,15	4,21	6,04	100,00	16,93	62,98	2,63	1,70	15,76	0,00	1,76	11,37	0,63	0,17	0,20	0,03	0,18
	10	36,68	21,45	31,59	0,96	4,03	5,29	100,00	16,38	65,95	2,22	1,25	14,20	0,00	1,77	11,42	0,66	0,16	0,20	0,02	0,16
1B-48 soi 2	1	37,04	20,60	31,25	1,19	4,26	5,66	100,00	17,15	63,76	2,72	1,54	14,84	0,00	1,77	11,39	0,64	0,17	0,21	0,03	0,16
	2	36,76	20,90	30,91	1,22	4,42	5,79	100,00	17,93	62,39	2,81	1,79	15,09	0,00	1,76	11,36	0,62	0,18	0,22	0,03	0,17
	3	36,33	21,22	30,82	1,21	4,19	6,23	100,00	17,19	61,61	2,82	2,19	16,18	0,00	1,75	11,32	0,62	0,17	0,21	0,03	0,18
	4	36,09	20,91	31,35	1,28	4,06	6,31	100,00	16,77	61,49	3,00	2,63	16,10	0,00	1,75	11,27	0,62	0,17	0,20	0,03	0,19
	5	36,26	20,63	32,35	0,97	4,86	4,93	100,00	19,98	63,19	2,27	2,12	12,45	0,00	1,76	11,31	0,63	0,20	0,25	0,02	0,15
	6	36,15	21,32	31,80	1,00	4,32	5,40	99,99	17,82	63,84	2,34	1,97	14,04	0,00	1,76	11,34	0,64	0,18	0,22	0,02	0,16
1B-48 soi 5	1	36,08	20,68	32,05	1,18	4,48	5,52	99,99	18,51	62,33	2,77	2,47	13,93	0,00	1,75	11,28	0,62	0,19	0,23	0,03	0,16
	6	36,68	20,68	30,56	1,25	4,08	6,76	100,01	16,58	60,79	2,89	2,33	17,42	0,00	1,75	11,31	0,61	0,17	0,20	0,03	0,20
	5	36,79	20,49	31,48	0,99	4,23	6,01	99,99	17,14	63,08	2,28	2,00	15,50	0,00	1,76	11,34	0,63	0,17	0,21	0,02	0,18
	4	36,60	20,47	30,54	1,55	3,86	6,98	100,00	15,72	60,26	3,59	2,58	17,85	0,00	1,75	11,28	0,60	0,16	0,19	0,04	0,20
	3	36,77	20,87	31,81	1,30	3,41	5,84	100,00	13,83	66,16	3,00	1,44	15,58	0,00	1,77	11,40	0,66	0,14	0,16	0,03	0,17
	2	36,86	20,86	30,79	1,18	3,62	6,69	100,00	14,64	63,20	2,71	1,77	17,68	0,00	1,76	11,37	0,63	0,15	0,17	0,03	0,19
	7	35,70	20,74	32,47	1,18	4,55	5,35	99,99	19,00	62,14	2,80	2,71	13,34	0,00	1,75	11,25	0,62	0,19	0,24	0,03	0,16
	8	36,46	20,95	30,17	0,98	4,36	7,07	99,99	17,83	59,12	2,28	2,69	18,08	0,00	1,74	11,27	0,59	0,18	0,22	0,02	0,21
	10	36,61	21,06	30,94	1,08	4,20	6,11	100,00	17,10	62,52	2,50	1,92	15,96	0,00	1,76	11,35	0,63	0,17	0,21	0,03	0,18
	9	35,96	20,42	32,57	1,22	4,42	5,41	100,00	18,32	62,68	2,87	2,63	13,49	0,00	1,75	11,26	0,63	0,18	0,22	0,03	0,16
1B-52 soi 1	1	37,60	20,79	35,49	0,00	2,97	3,15	100,00	11,81	79,18	0,00	0,00	9,00	0,00	1,81	11,55	0,79	0,12	0,13	0,00	0,09
	2	36,69	21,23	34,96	1,17	2,92	3,04	100,01	11,86	76,56	2,70	0,39	8,49	0,00	1,80	11,50	0,77	0,12	0,14	0,03	0,09
	3	37,47	21,04	34,15	1,02	2,91	3,42	100,01	11,59	76,31	2,31	0,00	9,79	0,00	1,81	11,55	0,76	0,12	0,13	0,02	0,10
	4	37,29	20,38	34,40	0,98	2,76	3,46	99,27	11,03	76,80	2,23	0,05	9,89	0,00	1,81	11,55	0,77	0,11	0,12	0,02	0,10
	5	37,92	21,28	33,74	0,80	2,98	3,28	100,00	12,06	76,57	1,84	0,00	9,54	0,00	1,81	11,55	0,77	0,12	0,14	0,02	0,10
	6	37,18	21,12	34,84	0,96	3,00	2,89	99,99	12,03	77,46	2,19	0,11	8,22	0,00	1,81	11,53	0,78	0,12	0,14	0,02	0,08
	7	38,06	21,95	33,05	1,22	3,08	2,64	100,00	12,72	76,58	2,86	0,00	7,84	0,00	1,81	11,55	0,77	0,13	0,15	0,03	0,08
	8	37,21	20,89	35,80	1,11	2,86	2,13	100,00	11,46	79,88	2,53	0,05	6,08	0,00	1,81	11,53	0,80	0,12	0,13	0,03	0,06
	9	37,16	21,08	34,59	1,16	2,80	3,21	100,00	11,23	76,87	2,64	0,13	9,12	0,00	1,81	11,54	0,77	0,11	0,13	0,03	0,09

образец	Спектр	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма	Пироп	Альмандин	Спессаргин	Анрадит	Гроссуляр	Уваровит	Ng	a0	X(Fe)	X(Mn)	X(Mg)	X(Ca)	X(Mg)/1- X(Mg)
1B-52 soi 2	2	37,18	21,27	34,77	1,08	3,30	2,41	100,01	13,23	77,36	2,46	0,09	6,86	0,00	1,81	11,53	0,77	0,13	0,15	0,03	0,07
	5	36,87	21,13	35,25	1,15	2,89	2,71	100,00	11,69	77,80	2,64	0,24	7,63	0,00	1,80	11,52	0,78	0,12	0,13	0,03	0,08
	6	37,33	20,84	35,56	1,12	2,77	2,39	100,01	11,06	79,54	2,54	0,01	6,85	0,00	1,81	11,54	0,80	0,11	0,12	0,03	0,07
A4-B-1 soi 5	1	37,91	21,56	29,29	0,00	5,42	5,82	100,00	21,31	62,24	0,00	0,56	15,89	0,00	1,78	11,50	0,62	0,21	0,27	0,00	0,16
	2	37,73	21,53	29,57	0,76	5,05	5,37	100,01	19,95	63,09	1,71	0,54	14,71	0,00	1,78	11,50	0,63	0,20	0,25	0,02	0,15
	3	37,36	21,17	29,43	1,47	4,09	6,13	99,65	16,32	62,77	3,33	0,78	16,80	0,00	1,78	11,48	0,63	0,16	0,20	0,03	0,18
	5	37,67	21,25	29,10	1,83	3,19	6,97	100,01	12,62	63,44	4,12	0,34	19,48	0,00	1,79	11,55	0,63	0,13	0,14	0,04	0,20
	6	37,57	21,26	30,06	1,53	3,13	6,44	99,99	12,42	65,77	3,45	0,31	18,06	0,00	1,79	11,54	0,66	0,12	0,14	0,03	0,18
	7	37,47	21,26	29,40	1,57	3,49	6,81	100,00	13,89	63,09	3,55	0,71	18,77	0,00	1,78	11,50	0,63	0,14	0,16	0,04	0,20
	8	37,02	21,25	30,43	1,79	3,34	6,17	100,00	13,45	64,60	4,10	1,03	16,83	0,00	1,78	11,46	0,65	0,13	0,16	0,04	0,18
	9	36,94	21,21	31,08	1,66	3,86	5,25	100,00	15,58	65,39	3,81	1,04	14,19	0,00	1,78	11,45	0,65	0,16	0,19	0,04	0,15
E-10-B soi 1	2	37,92	21,17	32,94	0,74	3,13	4,10	100,00	12,53	73,99	1,68	0,00	11,80	0,00	1,80	11,56	0,74	0,13	0,14	0,02	0,12
	4	37,11	21,81	32,44	0,66	3,33	4,65	100,00	13,38	71,69	1,51	0,27	13,16	0,00	1,80	11,53	0,72	0,13	0,15	0,02	0,13
	5	37,42	21,78	32,01	0,00	3,47	5,31	99,99	13,82	70,97	0,00	0,13	15,08	0,00	1,80	11,55	0,71	0,14	0,16	0,00	0,15
	6	37,62	21,78	31,41	0,00	3,45	5,74	100,00	13,69	69,93	0,00	0,00	16,37	0,00	1,80	11,57	0,70	0,14	0,16	0,00	0,16
	7	37,22	21,83	31,67	0,00	3,60	5,68	100,00	14,42	69,23	0,00	0,44	15,91	0,00	1,79	11,52	0,69	0,14	0,17	0,00	0,16
	9	37,26	21,52	33,19	0,00	3,33	4,70	100,00	13,32	73,16	0,00	0,26	13,26	0,00	1,80	11,53	0,73	0,13	0,15	0,00	0,14
E-19-2 soi 2	2	36,47	20,19	35,44	0,66	0,83	6,41	100,00	3,39	76,24	1,53	1,35	17,49	0,00	1,78	11,43	0,76	0,03	0,04	0,02	0,19
	3	36,49	20,92	36,77	0,55	0,74	4,53	100,00	3,02	82,40	1,28	0,36	12,94	0,00	1,81	11,53	0,82	0,03	0,03	0,01	0,13
	4	36,26	20,46	36,42	0,56	0,74	5,57	100,01	3,04	79,19	1,31	1,11	15,35	0,00	1,79	11,45	0,79	0,03	0,03	0,01	0,17
	5	36,51	20,88	35,45	0,59	0,96	5,60	99,99	3,92	78,28	1,37	0,68	15,75	0,00	1,80	11,50	0,78	0,04	0,04	0,01	0,16
	6	36,36	20,55	36,65	0,47	0,87	5,10	100,00	3,57	80,31	1,10	0,85	14,18	0,00	1,80	11,47	0,80	0,04	0,04	0,01	0,15
	7	37,21	21,41	35,26	0,59	0,76	4,77	100,00	3,13	81,39	1,38	0,00	14,11	0,00	1,81	11,57	0,81	0,03	0,03	0,01	0,14
E-19-2 soi 4	1	36,61	20,39	36,38	1,01	0,83	4,79	100,01	3,38	80,27	2,34	0,58	13,44	0,00	1,80	11,50	0,80	0,03	0,04	0,02	0,14
	2	36,22	20,12	37,14	0,74	0,57	5,22	100,01	2,35	80,48	1,73	1,15	14,29	0,00	1,79	11,44	0,81	0,02	0,02	0,02	0,15
	3	36,35	20,20	37,10	0,82	0,82	4,71	100,00	3,36	80,84	1,91	0,90	12,99	0,00	1,80	11,47	0,81	0,03	0,04	0,02	0,14
	4	36,92	20,84	36,13	0,88	0,62	4,61	100,00	2,51	82,05	2,02	0,00	13,41	0,00	1,81	11,57	0,82	0,03	0,03	0,02	0,13

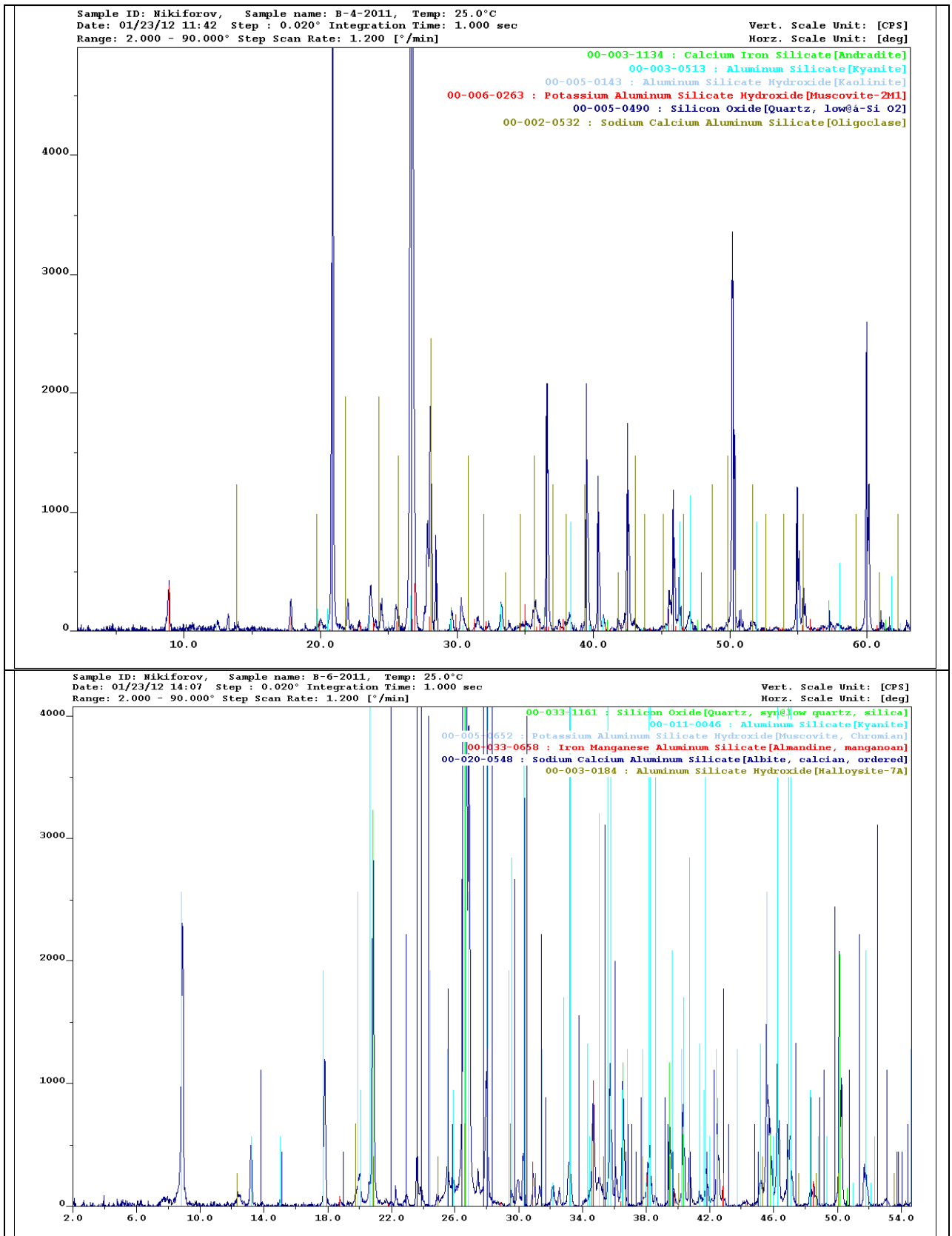
образец	Спектр	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма	Пироп	Альмандин	Спессаргин	Анрадит	Гроссулярь	Уваровит	Ng	a0	X(Fe)	X(Mn)	X(Mg)	X(Ca)	X(Mg)/1- X(Mg)
	5	36,29	20,36	37,29	1,02	0,00	5,03	99,99	0,00	82,77	2,38	0,68	14,17	0,00	1,80	11,50	0,83	0,00	0,00	0,02	0,15
	7	36,39	20,59	36,64	1,25	0,65	4,48	100,00	2,66	81,24	2,91	0,56	12,63	0,00	1,80	11,50	0,81	0,03	0,03	0,03	0,13
	8	37,22	21,43	34,62	1,27	0,66	4,80	100,00	2,72	80,08	2,98	0,00	14,23	0,00	1,81	11,57	0,80	0,03	0,03	0,03	0,14
E-21 soi 1	1	37,50	21,09	31,51	0,90	2,86	6,14	100,00	11,37	69,05	2,03	0,32	17,23	0,00	1,79	11,54	0,69	0,11	0,13	0,02	0,18
	2	37,61	20,86	30,93	0,99	3,42	6,19	100,00	13,56	66,58	2,23	0,57	17,06	0,00	1,79	11,51	0,67	0,14	0,16	0,02	0,18
	3	37,57	21,08	31,30	1,00	2,96	6,10	100,01	11,75	68,60	2,25	0,28	17,12	0,00	1,79	11,54	0,69	0,12	0,13	0,02	0,17
	4	37,94	21,56	30,21	1,42	2,98	5,89	100,00	11,94	67,88	3,23	0,00	16,96	0,00	1,80	11,58	0,68	0,12	0,14	0,03	0,17
	5	37,19	21,76	30,56	1,19	3,12	6,18	100,00	12,51	66,98	2,71	0,44	17,37	0,00	1,79	11,53	0,67	0,13	0,14	0,03	0,18
	6	37,71	21,07	30,23	1,39	2,79	6,81	100,00	11,03	66,50	3,12	0,16	19,19	0,00	1,80	11,57	0,67	0,11	0,12	0,03	0,19
E-21 soi 6	2	37,55	20,53	31,87	0,82	3,39	5,83	99,99	13,46	68,06	1,85	0,72	15,91	0,00	1,79	11,49	0,68	0,14	0,16	0,02	0,17
	3	37,58	21,23	31,44	0,86	2,85	6,04	100,00	11,31	69,54	1,94	0,11	17,11	0,00	1,80	11,56	0,70	0,11	0,13	0,02	0,17
	4	37,74	21,03	31,14	0,82	3,26	6,01	100,00	12,88	68,22	1,84	0,20	16,86	0,00	1,80	11,55	0,68	0,13	0,15	0,02	0,17
	5	37,38	21,21	32,06	0,75	2,72	5,88	100,00	10,85	70,60	1,70	0,28	16,58	0,00	1,80	11,54	0,71	0,11	0,12	0,02	0,17
	6	37,14	21,30	31,95	0,98	2,86	5,78	100,01	11,48	69,61	2,24	0,56	16,12	0,00	1,79	11,51	0,70	0,12	0,13	0,02	0,17
	7	37,05	21,87	31,68	0,79	3,07	5,52	99,98	12,35	69,88	1,81	0,37	15,60	0,00	1,79	11,53	0,70	0,12	0,14	0,02	0,16
	8	37,02	21,30	31,77	0,94	3,17	5,81	100,01	12,77	68,27	2,15	0,83	15,99	0,00	1,78	11,48	0,68	0,13	0,15	0,02	0,17
	9	37,44	21,38	31,61	0,74	2,46	6,37	100,00	9,80	70,30	1,67	0,08	18,15	0,00	1,80	11,57	0,70	0,10	0,11	0,02	0,18
E-23-F-1 soi 7	4	37,52	21,34	34,64	0,00	3,18	3,31	99,99	12,72	77,76	0,00	0,00	9,52	0,00	1,81	11,55	0,78	0,13	0,15	0,00	0,10
	5	37,36	20,89	34,12	0,82	3,23	3,58	100,00	12,89	74,99	1,86	0,21	10,06	0,00	1,80	11,53	0,75	0,13	0,15	0,02	0,10
	6	37,19	20,90	33,74	1,17	3,14	3,85	99,99	12,59	73,66	2,67	0,36	10,73	0,00	1,80	11,51	0,74	0,13	0,14	0,03	0,11
	7	37,35	20,81	34,18	0,82	2,98	3,86	100,00	11,89	75,17	1,86	0,22	10,85	0,00	1,80	11,53	0,75	0,12	0,14	0,02	0,11
	8	36,71	21,57	33,78	0,84	2,80	4,29	99,99	11,37	74,17	1,94	0,48	12,04	0,00	1,80	11,50	0,74	0,11	0,13	0,02	0,13
	9	36,61	21,41	33,97	0,83	3,06	4,12	100,00	12,46	73,56	1,92	0,67	11,39	0,00	1,79	11,48	0,74	0,13	0,14	0,02	0,12
	10	37,42	21,32	33,86	0,00	2,99	4,41	100,00	11,91	75,46	0,00	0,04	12,59	0,00	1,80	11,55	0,76	0,12	0,14	0,00	0,13
	11	37,79	21,24	33,84	0,79	2,35	3,99	100,00	9,53	77,01	1,82	0,00	11,63	0,00	1,81	11,56	0,77	0,10	0,11	0,02	0,12
	12	37,62	21,00	33,98	0,72	2,76	3,93	100,01	11,02	76,08	1,63	0,00	11,27	0,00	1,81	11,56	0,76	0,11	0,12	0,02	0,11
13	37,59	21,27	34,10	0,00	2,59	4,45	100,00	10,39	76,77	0,00	0,00	12,84	0,00	1,81	11,56	0,77	0,10	0,12	0,00	0,13	

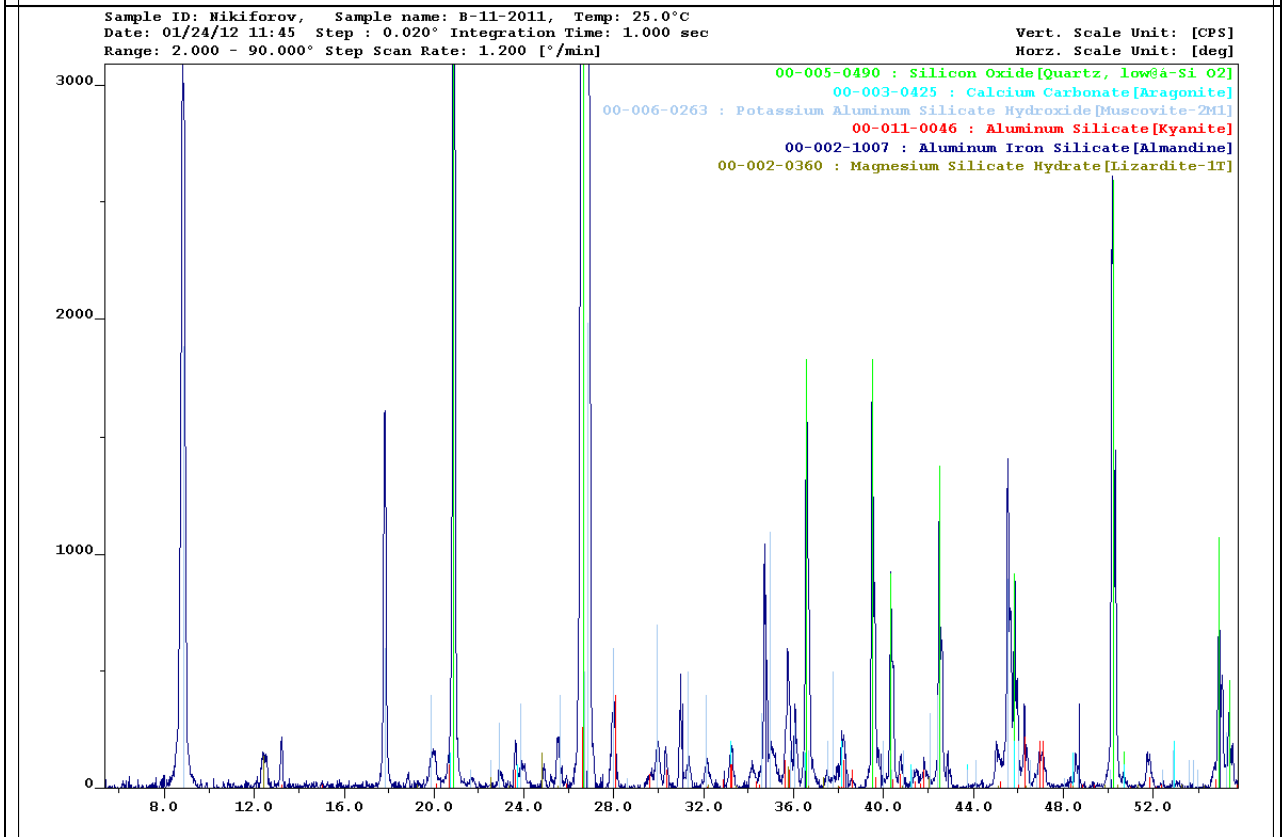
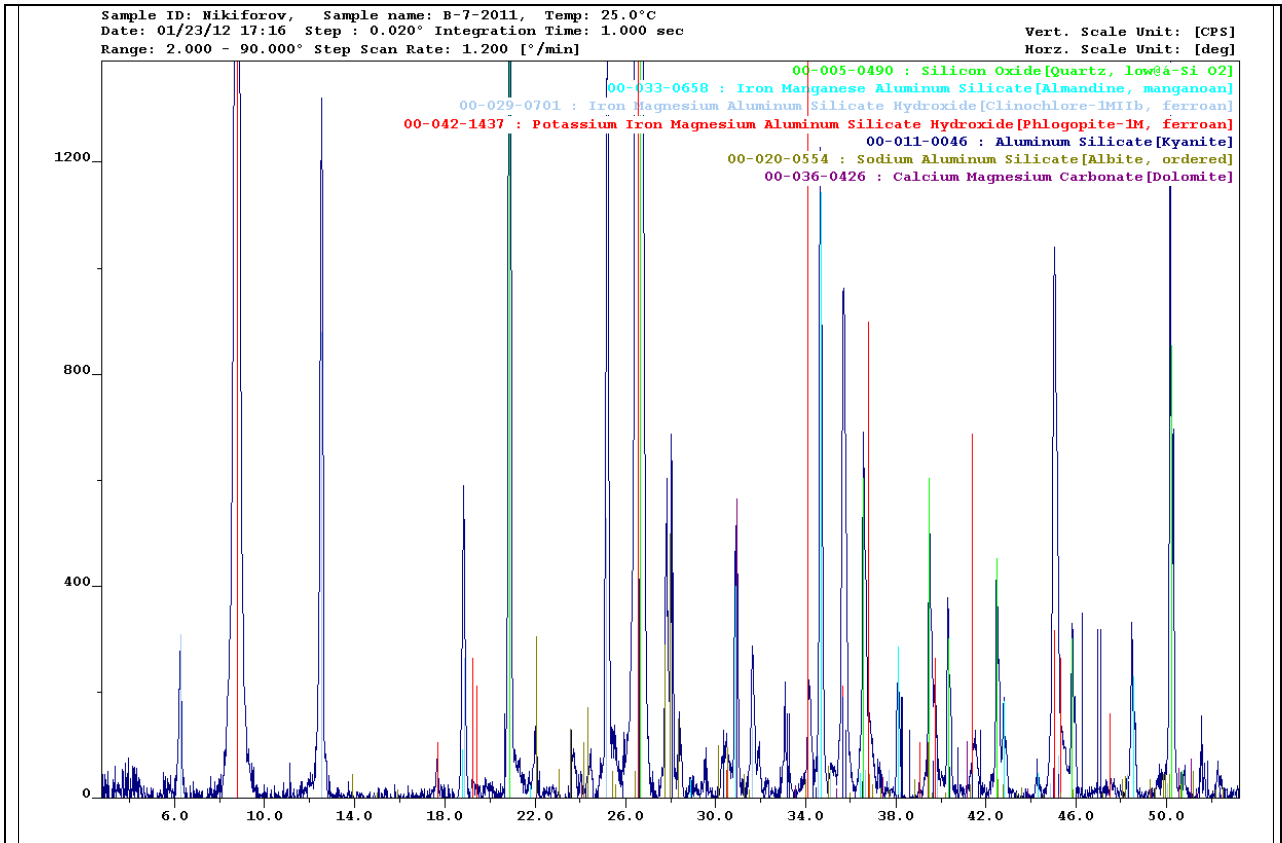
образец	Спектр	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма	Пироп	Альмандин	Спессаргин	Анрадит	Гроссуляр	Уваровит	Ng	a0	X(Fe)	X(Mn)	X(Mg)	X(Ca)	X(Mg)/1- X(Mg)
	14	36,76	21,11	34,07	1,33	2,53	4,20	100,00	10,26	74,43	3,07	0,53	11,71	0,00	1,80	11,50	0,74	0,10	0,11	0,03	0,12
	15	39,45	22,13	31,16	1,06	2,58	3,62	100,00	11,09	75,14	2,59	0,00	11,18	0,00	1,81	11,56	0,75	0,11	0,13	0,03	0,11
E-24-1 soi 1	1	37,53	21,08	32,32	0,00	4,61	4,47	100,01	18,31	68,93	0,00	0,57	12,19	0,00	1,79	11,49	0,69	0,18	0,22	0,00	0,13
	2	37,03	21,49	31,86	0,69	4,55	4,39	100,01	18,32	67,40	1,58	0,79	11,91	0,00	1,78	11,46	0,67	0,18	0,22	0,02	0,13
	3	37,34	21,37	31,10	0,66	4,58	4,95	100,00	18,29	66,01	1,50	0,73	13,48	0,00	1,78	11,48	0,66	0,18	0,22	0,02	0,14
	4	37,20	20,87	31,84	0,68	4,21	5,20	100,00	16,87	66,60	1,55	1,05	13,93	0,00	1,78	11,44	0,67	0,17	0,20	0,02	0,15
E-24-1 soi 5	2	37,13	21,03	32,02	1,13	4,09	4,59	99,99	16,42	67,76	2,58	0,81	12,43	0,00	1,78	11,46	0,68	0,16	0,20	0,03	0,13
	8	37,79	20,99	30,76	0,81	4,36	5,29	100,00	17,20	65,99	1,82	0,46	14,54	0,00	1,79	11,51	0,66	0,17	0,21	0,02	0,15
E-24-1 soi 6	1	36,86	21,44	31,75	0,63	4,16	5,16	100,00	16,83	66,73	1,45	1,08	13,92	0,00	1,78	11,44	0,67	0,17	0,20	0,01	0,15
	2	37,46	21,23	31,16	0,61	4,38	5,15	99,99	17,43	66,46	1,38	0,65	14,08	0,00	1,78	11,49	0,67	0,17	0,21	0,01	0,15
	3	37,17	21,64	30,96	0,83	4,53	4,87	100,00	18,17	65,90	1,89	0,73	13,31	0,00	1,78	11,48	0,66	0,18	0,22	0,02	0,14
	4	37,21	21,64	31,19	1,00	3,87	5,10	100,01	15,51	67,53	2,28	0,53	14,16	0,00	1,79	11,50	0,68	0,16	0,18	0,02	0,15
	5	37,32	21,44	32,70	1,20	3,86	3,47	99,99	15,42	71,90	2,72	0,20	9,76	0,00	1,80	11,53	0,72	0,15	0,18	0,03	0,10
	9	37,18	20,94	32,49	1,40	3,81	4,18	100,00	15,28	69,49	3,19	0,62	11,43	0,00	1,79	11,49	0,70	0,15	0,18	0,03	0,12
	11	38,64	22,30	31,60	2,20	1,70	3,55	99,99	7,32	76,32	5,38	0,00	10,98	0,00	1,81	11,56	0,76	0,07	0,08	0,05	0,11
E-26-3 soi 2	1	35,73	19,97	39,01	0,00	2,84	2,44	99,99	11,85	80,83	0,00	1,00	6,31	0,00	1,79	11,42	0,81	0,12	0,13	0,00	0,07
	2	34,61	19,27	39,46	0,53	2,94	2,61	99,42	12,66	77,96	1,30	1,69	6,39	0,00	1,78	11,34	0,78	0,13	0,15	0,01	0,08
	3	35,13	19,51	39,10	0,53	2,58	2,58	99,43	10,95	79,91	1,28	1,32	6,55	0,00	1,79	11,39	0,80	0,11	0,12	0,01	0,08
	4	34,82	19,78	39,18	0,51	2,72	2,50	99,51	11,65	79,42	1,24	1,38	6,31	0,00	1,79	11,38	0,79	0,12	0,13	0,01	0,08
	5	36,33	19,82	38,50	0,48	3,00	1,87	100,00	12,31	81,06	1,12	0,58	4,93	0,00	1,80	11,47	0,81	0,12	0,14	0,01	0,06
	6	35,42	20,10	39,90	0,00	2,58	2,00	100,00	10,86	83,09	0,00	0,86	5,19	0,00	1,80	11,44	0,83	0,11	0,12	0,00	0,06
	7	34,99	19,96	39,65	0,53	2,86	1,55	99,54	12,19	81,79	1,28	0,77	3,98	0,00	1,80	11,44	0,82	0,12	0,14	0,01	0,05
	8	34,72	19,66	40,17	0,00	3,12	1,75	99,42	13,40	81,20	0,00	1,02	4,38	0,00	1,79	11,41	0,81	0,13	0,16	0,00	0,05
	9	35,49	20,18	40,16	0,00	2,85	1,33	100,01	11,97	84,01	0,00	0,55	3,47	0,00	1,80	11,47	0,84	0,12	0,14	0,00	0,04
	10	35,40	19,56	40,03	0,00	2,82	2,19	100,00	11,88	81,50	0,00	1,11	5,52	0,00	1,79	11,41	0,82	0,12	0,14	0,00	0,07
	11	34,75	20,06	39,56	0,00	2,47	3,15	99,99	10,60	79,69	0,00	1,80	7,91	0,00	1,78	11,34	0,80	0,11	0,12	0,00	0,10
	12	35,96	19,61	38,14	0,75	2,73	2,81	100,00	11,32	78,54	1,77	1,14	7,23	0,00	1,79	11,41	0,79	0,11	0,13	0,02	0,08

образец	Спектр	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма	Пироп	Альмандин	Спессаргин	Анрадит	Гроссулярь	Уваровит	Ng	a0	X(Fe)	X(Mn)	X(Mg)	X(Ca)	X(Mg)/1- X(Mg)
	13	34,98	19,87	39,35	0,77	2,54	2,48	99,99	10,83	79,71	1,86	1,34	6,26	0,00	1,79	11,39	0,80	0,11	0,12	0,02	0,08
	14	35,82	19,52	39,38	0,00	2,68	2,10	99,50	11,15	82,57	0,00	0,80	5,48	0,00	1,80	11,44	0,83	0,11	0,13	0,00	0,06
	15	35,08	19,95	39,38	0,48	2,70	2,41	100,00	11,47	80,01	1,16	1,26	6,10	0,00	1,79	11,39	0,80	0,12	0,13	0,01	0,07
	16	35,50	20,00	39,16	0,00	2,73	1,93	99,32	11,46	82,71	0,00	0,73	5,09	0,00	1,80	11,45	0,83	0,12	0,13	0,00	0,06
	17	35,28	20,38	39,48	0,00	2,66	2,19	99,99	11,24	82,11	0,00	0,96	5,69	0,00	1,79	11,43	0,82	0,11	0,13	0,00	0,07
	18	35,05	19,59	38,34	0,85	2,41	2,47	98,71	10,25	80,15	2,05	1,11	6,44	0,00	1,79	11,41	0,80	0,10	0,11	0,02	0,08
	19	35,78	19,47	38,81	0,60	2,77	2,56	99,99	11,54	79,37	1,42	1,15	6,51	0,00	1,79	11,41	0,79	0,12	0,13	0,01	0,08
E-26-3 soi 3	1	35,46	20,50	38,72	0,00	2,09	3,23	100,00	8,79	81,45	0,00	1,23	8,53	0,00	1,79	11,41	0,82	0,09	0,10	0,00	0,10
	2	35,98	20,03	38,24	0,00	2,87	2,89	100,01	11,89	79,50	0,00	1,08	7,53	0,00	1,79	11,42	0,80	0,12	0,14	0,00	0,09
	5	35,25	19,71	39,46	0,00	2,46	3,12	100,00	10,40	80,11	0,00	1,61	7,87	0,00	1,78	11,36	0,80	0,10	0,12	0,00	0,10
	3	35,27	20,32	38,61	0,61	2,28	2,91	100,00	9,64	80,06	1,47	1,28	7,56	0,00	1,79	11,40	0,80	0,10	0,11	0,02	0,09
E-26-3 soi 4	1	35,31	20,26	37,97	0,85	2,39	3,22	100,00	10,09	78,10	2,04	1,46	8,32	0,00	1,78	11,38	0,78	0,10	0,11	0,02	0,10
	2	35,33	20,21	38,78	0,00	2,38	3,30	100,00	10,04	79,95	0,00	1,50	8,51	0,00	1,78	11,38	0,80	0,10	0,11	0,00	0,10
	4	35,47	20,78	38,15	0,00	2,52	3,07	99,99	10,59	80,14	0,00	1,15	8,12	0,00	1,79	11,41	0,80	0,11	0,12	0,00	0,09
	6	35,64	19,71	37,74	0,00	2,75	3,25	99,09	11,50	78,73	0,00	1,28	8,49	0,00	1,79	11,40	0,79	0,12	0,13	0,00	0,10
	7	35,54	19,82	38,77	0,00	2,47	3,40	100,00	10,36	79,39	0,00	1,57	8,69	0,00	1,78	11,37	0,79	0,10	0,12	0,00	0,10
	8	35,22	20,36	38,64	0,00	2,62	3,15	99,99	11,09	79,33	0,00	1,48	8,11	0,00	1,78	11,38	0,79	0,11	0,13	0,00	0,10
	9	35,33	20,06	38,77	0,00	2,61	3,24	100,01	11,01	79,16	0,00	1,56	8,27	0,00	1,78	11,37	0,79	0,11	0,12	0,00	0,10
E-26-3 soi 5	1	35,52	20,09	38,68	0,00	2,59	3,11	99,99	10,87	79,75	0,00	1,36	8,02	0,00	1,79	11,39	0,80	0,11	0,12	0,00	0,09
	2	36,10	20,11	38,21	0,00	2,76	2,82	100,00	11,40	80,23	0,00	0,94	7,43	0,00	1,79	11,43	0,80	0,11	0,13	0,00	0,08
	3	35,97	19,99	38,50	0,00	2,63	2,90	99,99	10,90	80,46	0,00	1,05	7,59	0,00	1,79	11,42	0,81	0,11	0,12	0,00	0,09
E-26-3 soi 8	1	35,24	19,79	39,67	0,00	2,57	2,73	100,00	10,87	80,83	0,00	1,39	6,91	0,00	1,79	11,38	0,81	0,11	0,12	0,00	0,08
	2	35,74	19,39	39,23	0,00	2,85	2,80	100,01	11,89	79,72	0,00	1,33	7,06	0,00	1,79	11,39	0,80	0,12	0,14	0,00	0,08
	3	35,30	20,28	38,35	0,80	2,14	3,14	100,01	9,04	79,51	1,92	1,37	8,16	0,00	1,79	11,39	0,80	0,09	0,10	0,02	0,10
V13-11G soi 2	1	36,71	21,48	32,15	0,70	3,71	5,24	99,99	15,07	68,03	1,62	1,08	14,22	0,00	1,78	11,44	0,68	0,15	0,18	0,02	0,15
	2	37,84	21,06	31,78	0,85	3,79	4,67	99,99	14,93	69,94	1,90	0,06	13,16	0,00	1,80	11,55	0,70	0,15	0,18	0,02	0,13
	3	37,80	20,75	33,78	0,72	2,57	4,39	100,01	10,25	75,55	1,63	0,00	12,58	0,00	1,81	11,56	0,76	0,10	0,11	0,02	0,13
	4	37,02	21,17	33,57	0,58	3,39	4,23	99,96	13,65	72,78	1,33	0,53	11,71	0,00	1,79	11,50	0,73	0,14	0,16	0,01	0,12
	5	37,23	21,79	33,13	0,00	3,10	4,78	100,03	12,41	73,83	0,00	0,12	13,64	0,00	1,80	11,55	0,74	0,12	0,14	0,00	0,14
636 soi 5	1	37,37	20,71	35,42	0,62	2,84	3,04	100,00	11,33	78,55	1,41	0,09	8,62	0,00	1,81	11,54	0,79	0,11	0,13	0,01	0,09
	2	36,09	20,78	36,52	1,15	2,77	2,69	100,00	11,44	77,87	2,70	0,72	7,26	0,00	1,80	11,46	0,78	0,11	0,13	0,03	0,08
	9	37,31	20,59	35,08	0,70	3,11	3,21	100,00	12,43	76,77	1,59	0,26	8,96	0,00	1,80	11,52	0,77	0,12	0,14	0,02	0,09

Приложение 2.

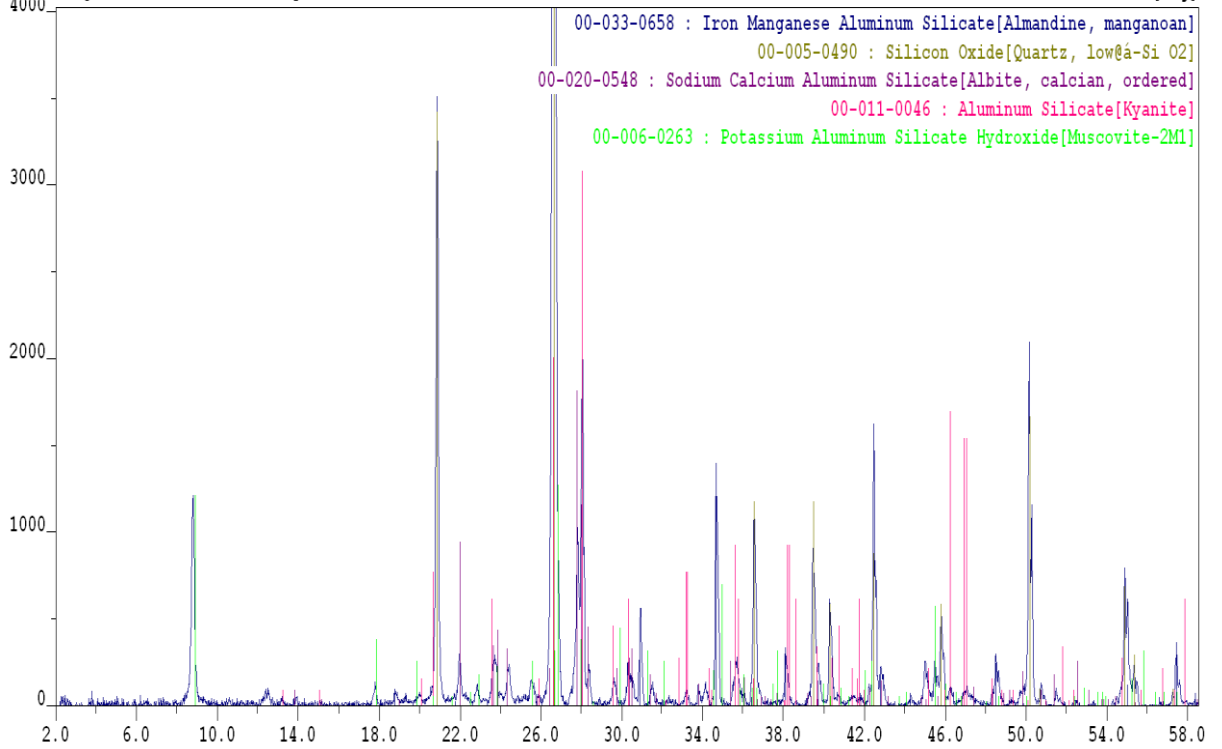
Результаты РСА проб месторождения «Высота-181» (МТП).





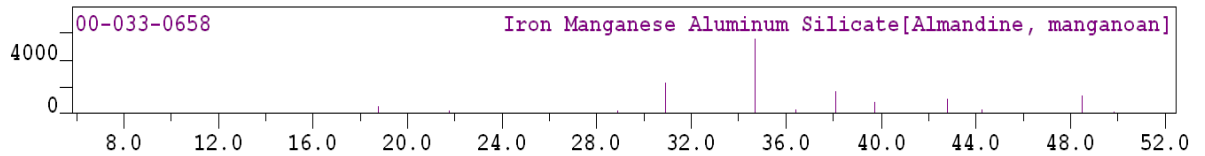
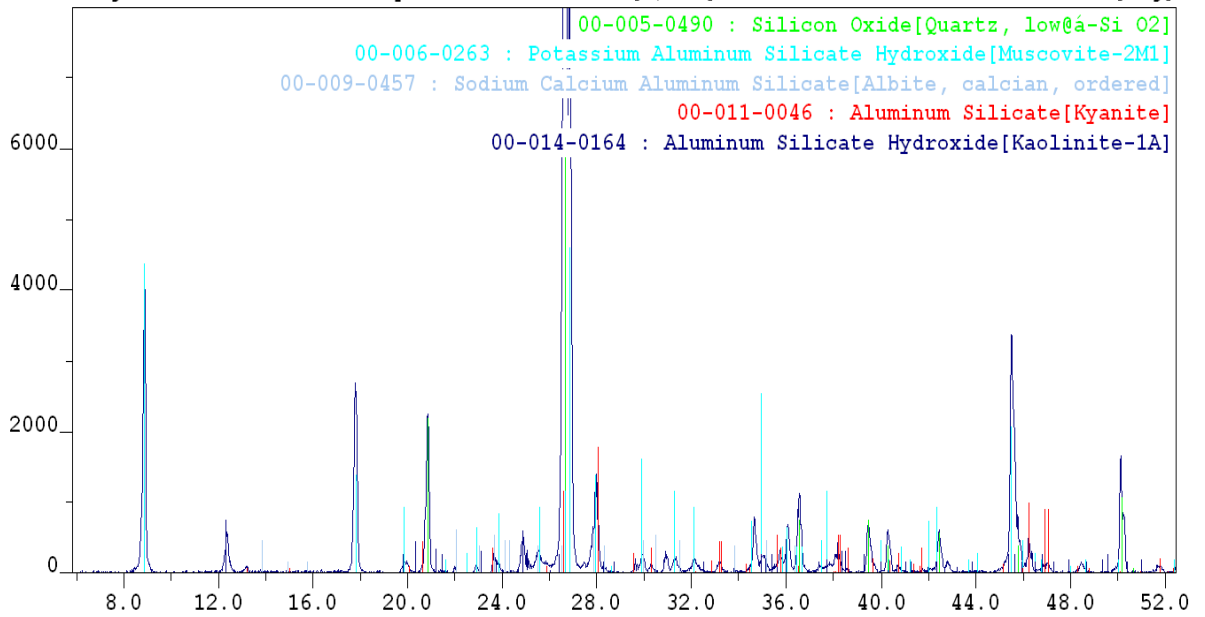
Sample ID: Nikiforov, Sample name: B-11-2011, Temp: 25.0°C
Date: 01/24/12 14:48 Step : 0.020° Integration Time: 1.000 sec
Range: 2.000 - 90.000° Step Scan Rate: 1.200 [°/min]

Vert. Scale Unit: [CPS]
Horz. Scale Unit: [deg]

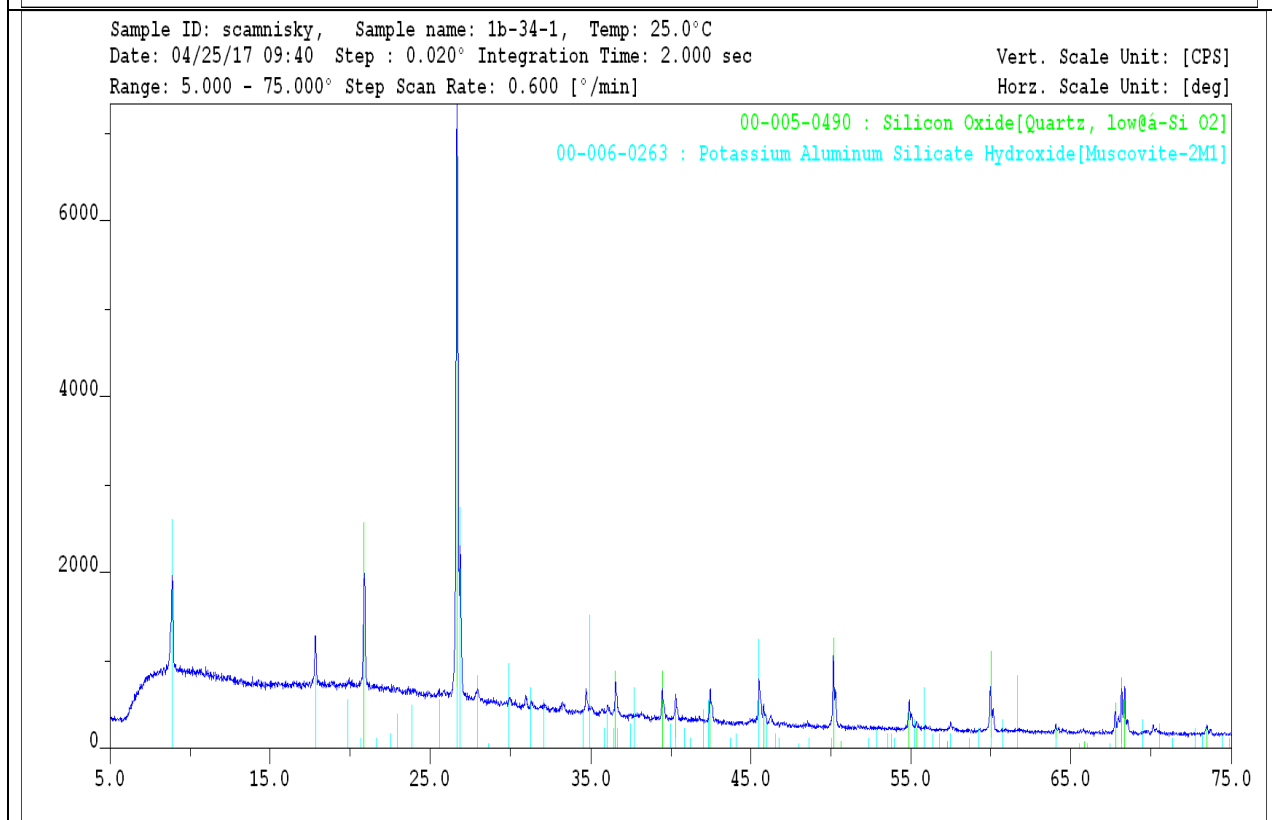
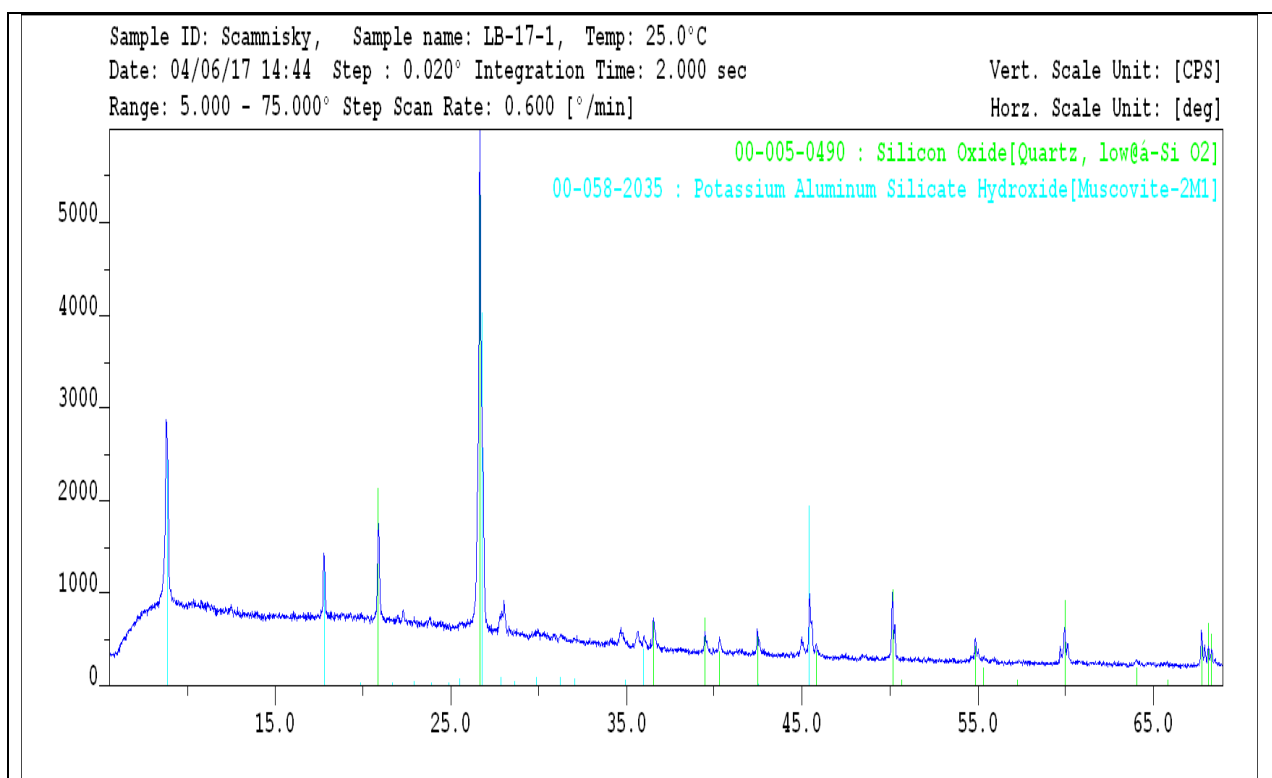


Sample ID: Nikiforov, Sample name: 486-2011, Temp: 25.0°C
Date: 01/24/12 16:28 Step : 0.020° Integration Time: 1.000 sec
Range: 2.000 - 90.000° Step Scan Rate: 1.200 [°/min]

Vert. Scale Unit: [CPS]
Horz. Scale Unit: [deg]

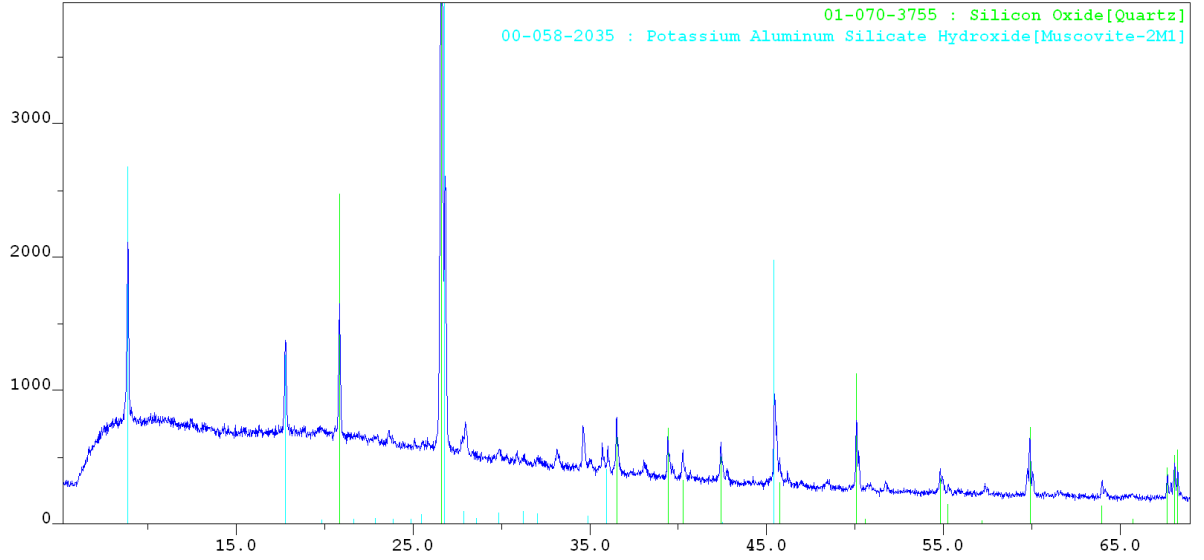


Результаты РСА мусковитового концентрата (месторождение «Высота-181»;
технолог-обоганитель – Скамницкая Л. С.)



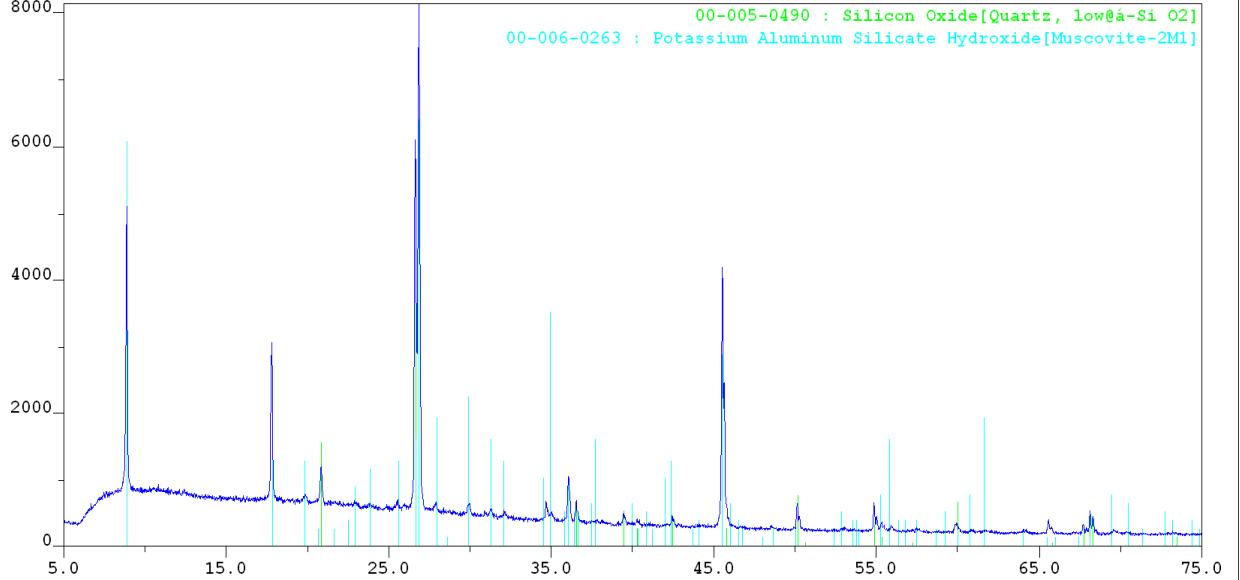
Sample ID: Scamnisky, Sample name: 1B-46-1, Temp: 25.0°C
Date: 04/10/17 14:05 Step : 0.020° Integration Time: 2.000 sec
Range: 5.000 - 75.000° Step Scan Rate: 0.600 [°/min]

Vert. Scale Unit: [CPS]
Horz. Scale Unit: [deg]



Sample ID: Scamnisky, Sample name: 1b-57-1, Temp: 25.0°C
Date: 04/11/17 13:54 Step : 0.020° Integration Time: 2.000 sec
Range: 5.000 - 75.000° Step Scan Rate: 0.600 [°/min]

Vert. Scale Unit: [CPS]
Horz. Scale Unit: [deg]



Приложение 3. 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].

E-15	E-22-BC	E-10-B	NV-7	E-22-B	E-22-T	Номер образца (Grt)	
						7Li	9Be
7,92	10,61	12,90	24,57	10,05	9,97	14,35	ppm
0,05	0,05	0,04	0,04	0,01	<PO	2,02	ppm
267,60	627,10	468,50	344,60	564,00	473,10	3546,00	ppm
47,10	128,10	97,82	163,30	126,50	115,60	29,74	ppm
605,10	6662,00	678,50	264,20	7028,00	2024,00	10760,00	ppm
239,40	165,80	75,52	84,82	166,30	151,00	275,60	ppm
109,90	342,80	192,50	19,17	347,80	344,80	64,09	ppm
14560,00	7806,00	5671,00	6378,00	7938,00	8190,00	1445,00	ppm
38,99	31,09	22,95	23,48	30,68	30,25	40,49	ppm
15,21	15,40	12,07	11,98	14,97	12,82	47,36	ppm
8,81	16,08	4,08	1,76	14,28	6,30	64,89	ppm
52,08	89,45	53,90	29,73	87,55	78,00	154,20	ppm
8,72	5,72	4,48	4,03	5,60	5,74	25,98	ppm
0,29	0,36	0,40	0,28	0,39	0,20	96,32	ppm
2,13	4,74	2,58	1,38	4,45	2,74	2667,00	ppm
78,64	65,45	154,20	163,80	64,03	67,86	30,69	ppm
14,20	55,26	31,60	22,84	53,31	42,68	213,10	ppm
0,26	1,88	0,64	0,26	2,12	0,77	7,65	ppm
0,17	0,64	0,17	0,12	0,69	0,34	1,52	ppm
0,05	0,07	0,05	0,04	0,07	0,06	0,17	ppm
1,35	0,51	1,13	0,40	0,44	0,44	0,56	ppm
1,80	1,74	1,56	1,56	1,61	2,02	4,42	ppm
0,13	0,15	0,08	0,10	0,17	0,13	0,42	ppm
<PO	<PO	0,12	<PO	<PO	0,15	0,59	ppm
0,03	0,07	0,06	0,05	0,07	0,04	3,91	ppm
12,84	48,59	20,47	3,41	33,66	18,05	1739,00	ppm
1,09	1,93	1,32	1,28	1,21	0,57	89,60	ppm
2,91	4,64	3,09	3,09	2,93	1,33	197,90	ppm
0,37	0,64	0,37	0,41	0,39	0,21	24,85	ppm
1,88	2,80	1,52	1,67	1,85	1,06	97,88	ppm
1,61	1,48	0,63	0,85	1,22	1,00	19,17	ppm
0,91	0,66	0,30	0,61	0,59	0,52	4,42	ppm
6,54	4,85	3,32	4,57	4,45	4,51	14,04	ppm
1,62	1,26	1,68	1,80	1,18	1,22	1,69	ppm
13,05	10,36	19,24	19,19	9,93	10,20	6,79	ppm
2,98	2,44	5,15	5,59	2,30	2,36	1,12	ppm
9,49	7,63	17,71	21,01	7,25	7,09	2,93	ppm
1,41	1,11	2,59	3,40	1,04	1,03	0,38	ppm
9,98	7,84	17,47	24,09	7,16	6,65	2,37	ppm
1,39	1,13	2,48	3,41	1,07	0,95	0,30	ppm
0,50	1,52	1,03	0,68	1,53	1,23	5,71	ppm
0,11	0,43	0,22	0,17	0,46	0,22	1,12	ppm
0,14	0,21	0,20	0,24	0,22	0,20	1,31	ppm
210,00	300,85	135,35	12,61	268,35	96,69	0,21	ppm
6,10	4,26	1,99	0,54	1,02	0,54	13,95	ppm
0,69	0,10	0,23	0,10	0,11	0,08	0,17	ppm
0,19	0,43	0,76	0,58	0,36	0,18	7,54	ppm
0,05	0,28	0,32	0,16	0,27	0,18	1,87	ppm