

УДК 553.69 (470.22)

ФАКТОРЫ КОНТРОЛЯ КОМПЛЕКСНЫХ ГРАНАТОВЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ВЫСОТА-181»

А. Г. Никифоров

Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск

Актуальность работы связана с тем, что во всем мире увеличивается важность комплексной оценки минеральных ресурсов, особенно в случаях совместного появления минералов с близкими или одинаковыми технологическими свойствами. Для достоверного и полного картирования рудных тел, разделения руд по типам, особенно в областях интенсивных метаморфических преобразований, важно учитывать все факторы, обеспечивающие контроль руд. На формирование комплексных гранатовых руд месторождения «Высота-181» Хизоваарского рудного поля важнейшее влияние оказали метаморфические процессы и метасоматоз кислотных и основных фаций. В состав комплексных руд входят такие промышленные минералы, как гранат, кианит, ставролит и мусковит. Для месторождения «Высота-181» факторы контроля руд могут быть подразделены на три группы: литологические, петрологические и структурные. Наибольшее значение для формирования руд имеют состав протолита и процессы метасоматоза кислотных и основных фаций. Минералоготехнологическое картирование пород месторождения позволяет выделить три типа руд: кианит-ставролитовые, мусковитовые и гранатовые. Для данных типов руд в работе выявлены наиболее характерные факторы контроля. Результаты работы могут быть использованы для оценки рудных проявлений и месторождений промышленных минералов, возникновение которых связано с региональным метаморфизмом и метасоматозом протерозоя Фенноскандинавского щита.

Ключевые слова: Фенноскандинавский щит; контроль руд; промышленные минералы; гранат; кианит; мусковит; ставролит.

A. G. Nikiforov. COMPLEX GARNET ORE CONTROL FACTORS FOR THE VYSOTA-181 DEPOSIT

The need for this study arises from the globally growing demand for integrated assessment of mineral resources, particularly in the cases of co-occurrence of minerals with similar or identical processing characteristics. To ensure reliable and full ore body mapping and discrimination of ore types, especially in areas with intensive metamorphic alteration, it is essential to take into account all ore control factors. The main controls of the complex garnet ore formation in the Vysota-181 deposit were metamorphic processes and metasomatism of acid and base facies. The industrial minerals in the complex ore are garnet, kyanite, staurolite, muscovite. Ore control factors for the Vysota-181 deposit can be arranged into three groups: lithological, petrological, and structural. Of primary importance for ore formation are the protolith composition and metasomatism of acid and base facies. Geometallurgical mapping of the deposit reveals three types of ores: kyanite-staurolite-, muscovite-, and garnet-type. The most characteristic control factors for these ore types were identified in this study. The results of the study can be used to as-

sess ore occurrences and industrial mineral deposits associated with regional Proterozoic metamorphism and metasomatism in the Fennoscandian shield.

Key words: Fennoscandian shield; ore control; industrial minerals; garnet; kyanite; muscovite; staurolite.

Введение

Для зеленокаменных поясов Северной Карелии характерно формирование руд промышленных минералов – кварца, граната, кианита, ставролита, графита, мусковита, пирита, талька [Щипцов, 2007]. Формирование руд связано с многоэтапными метаморфическими и метасоматическими процессами. Непосредственно в пределах Хизоваарской структуры получили развитие кианитовые (северная и южная линзы месторождения «Хизоваара») [Щипцов и др., 1988], мусковитовые (месторождение «Восточная Хизоваара»), гранатовые (месторождение «Высота-181») руды, проявления декоративных пород («фукситовый» участок) [Щипцов и др., 1988]. Для всех руд характерна комплексность и химическая специализация промышленных минералов. Это связано в первую очередь с глубоким многоэтапным метаморфизмом и метасоматозом. На месторождении «Высота-181» комплексные гранатовые руды приурочены к участкам интенсивного метаморфизма амфиболитовой фации и метасоматоза кислотных и основных фаций. В наибольшей степени метасоматическим процессам подверглись комплексы гранат-биотитовых гнейсов, с которыми связан наибольший объем руд месторождения. Целью статьи является описание структурных, метаморфических и метасоматических процессов в качестве рудоконтролирующих факторов для руд месторождения «Высота-181», выявление степени их важности для процессов оруденения.

Методы картирования и анализа

Для анализа метасоматической зональности и ассоциированных с ней комплексных руд применялась методика минералого-технологического картирования на основе выделения метаморфических типов протолита, петрографического состава метасоматических зон и технологических испытаний для малых технологических проб [Никифоров, 2015]. Данный способ удобен для крупномасштабной съемки [Геологическая..., 1996] и позволяет отследить закономерности распределения промышленных минералов. Основной акцент статьи сделан на классификации рудоконтролирующих

факторов и типов руд, в связи с этим было проведено петрографическое исследование шлифов из ориентированных образцов для выявления микроструктурных особенностей, минералогический и рентгено-флюоресцентный (с выделением петрогенных элементов) анализы для изучения химических и минеральных трендов изменения пород в зависимости от степени метасоматической переработки. Изучение составов минералов и их химической зональности проводилось на СЭМ VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments). Для определения РТ-параметров использовался программный комплекс TWQ [Aranovich, Berman, 1996; Berman, Aranovich, 1996] и приложения TWQ_Comb, TWQ_View Д. В. Доливо-Добровольского (ИГГД РАН). Обозначения минералов приводятся по Кретцу [Kretz, 1983].

Геологическое строение Хизоваарского рудного поля

Хизоваарское рудное поле было впервые описано как рудный узел кианитовых месторождений в результате комплексных геологоразведочных работ, проведенных под руководством Н. А. Волотовской. В процессе съемочных работ была выделена Хизоваарская структура (рис. 1), сложенная кристаллическими сланцами и амфиболитами архейского возраста [Борисов, Волотовская, 1941]. В структурном отношении она была описана как замок синклинальной складки, осложненной мелкими складками и сбросами. При геологической съемке были оконтурены три перспективные линзы кианитовых руд – северная, южная и восточная. Сложены линзы в основном кианитовыми гнейсами и кварц-кианитовыми метасоматитами со сложным петрографическим составом. Позже той же группой под руководством Волотовской было проведено доизучение пород свиты [Волотовская, Жиров, 1948]. В результате метаморфические комплексы были разделены следующим образом (систематика как у авторов):

1. Сланцы мусковитовые, двуслюдяно-гранатовые, мусковито-гранатовые.
2. Гнейсы биотитовые, биотит-гранатовые и биотит-амфиболовые.
3. Амфиболиты полевошпатовые и гранатовые.

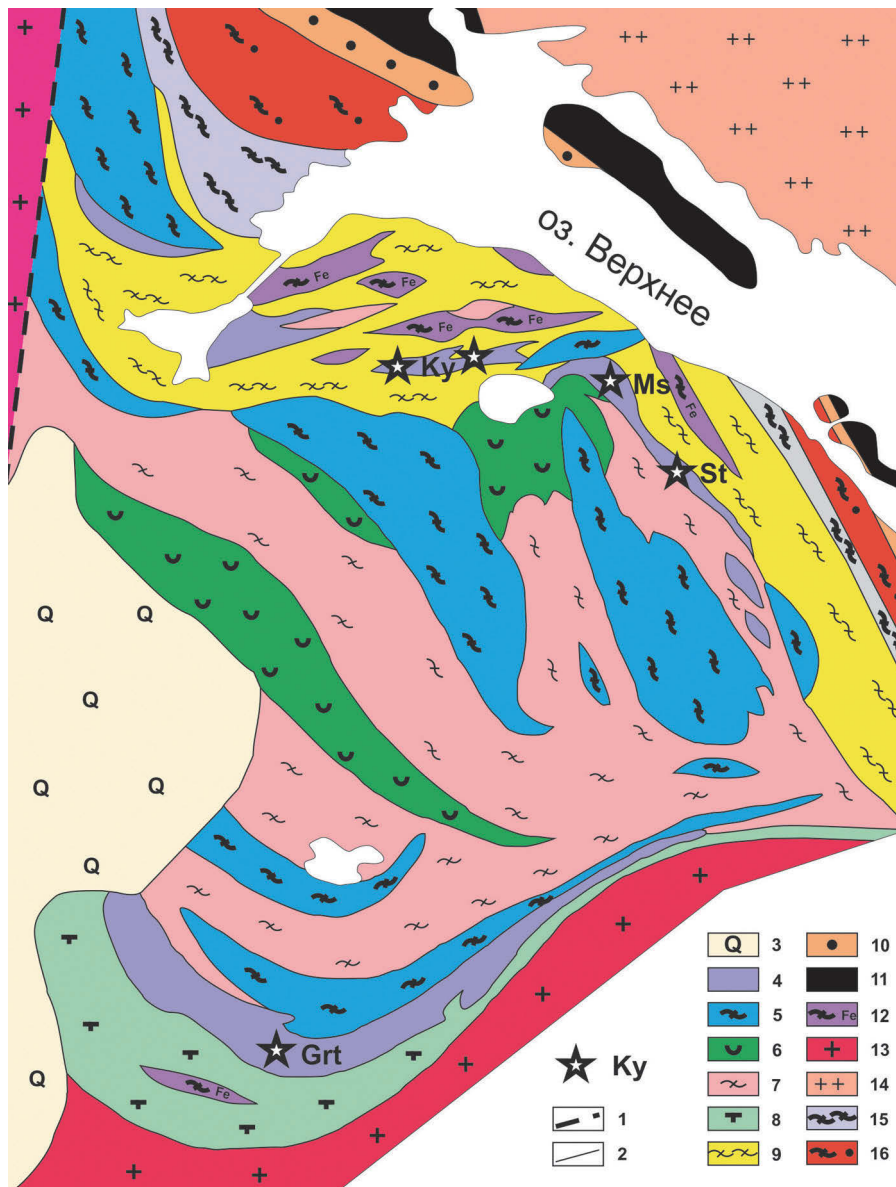


Рис. 1. Схема Хизоваарского рудного поля с проявлениями различных промышленных минералов в зонах интенсивной метасоматической переработки (на основе материалов В. В. Щипцова): 1 – тектонические нарушения, 2 – геологические границы, 3 – четвертичные отложения, 4 – кислотные метасоматиты, 5 – амфиболиты, 6 – метаморфизованные лавы и туфы, 7 – метадациты и метариолиты, 8 – силлы габбро, 9 – осадочно-вулканогенные и терригенные метаморфиты андезитового ряда, 10 – метавулканы бонинитовой серии, 11 – метаперидотиты, 12 – Mg-Fe-интрузивы, 13 – диориты и гранодиориты, 14 – микроклиновые граниты, 15 – метаандезиты, 16 – железистые metabазальты

Многоэтапные исследования в пределах структуры привели к оконтуриванию линз кианитовых месторождений, а впоследствии к выявлению, описанию и оценке новых объектов Хизоваарского рудного поля, детальному изучению метаморфизма и метасоматоза. У большинства исследователей практически не вызывает разногласий версия о сложноскладчатой структуре Хизоваарского рудного поля и о двух

четко установленных этапах метаморфизма, сформировавших современные рудовмещающие комплексы. Современные представления о структуре предполагают наличие в обрамлении структуры областей проявления кислотного метасоматоза, к которым и приурочены проявления и месторождения кианитовых, мусковитовых, ставролитовых, кварцевых и гранатовых руд.

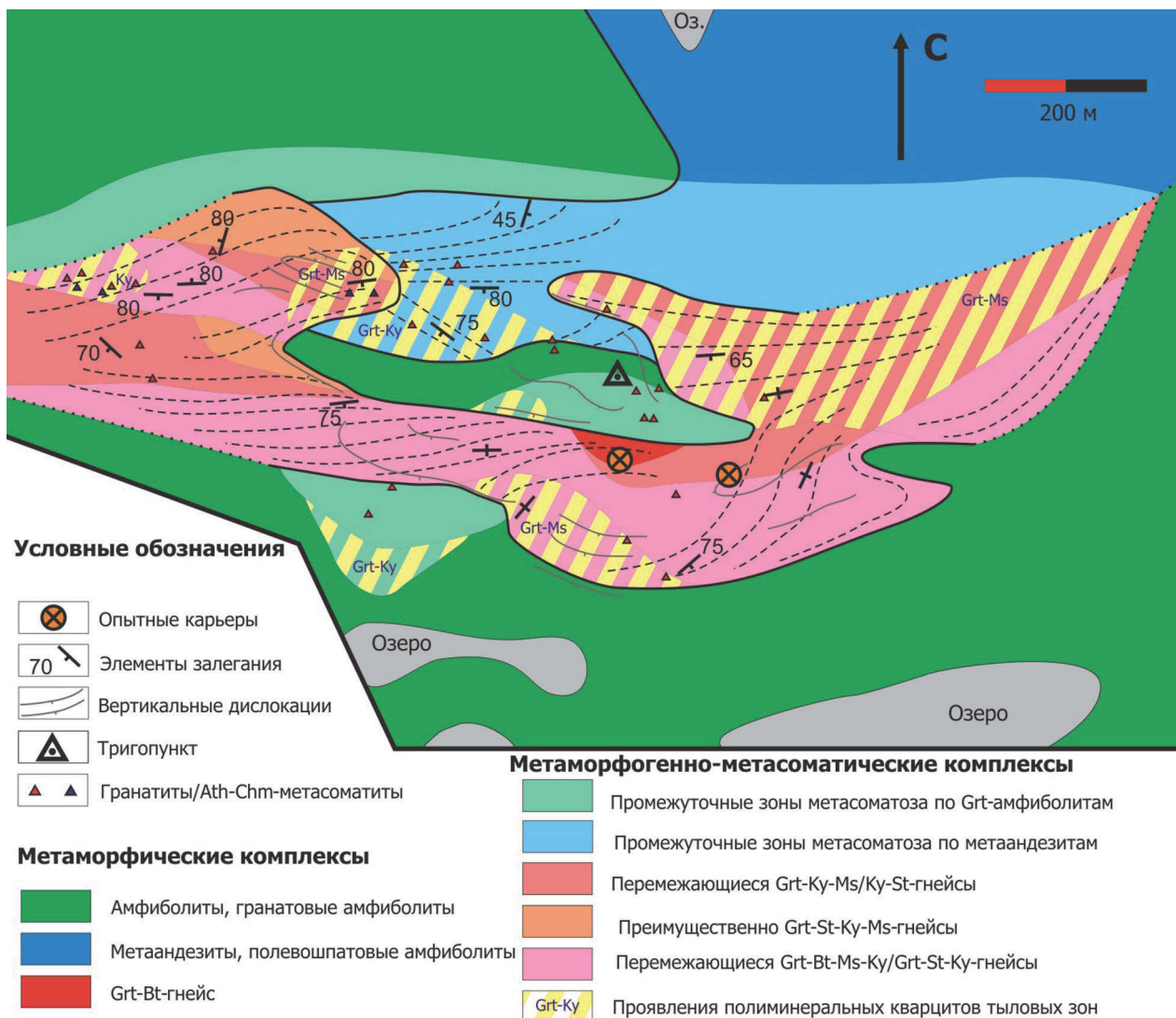


Рис. 2. Схема геологического строения месторождения «Высота-181»

Из-за глубокой метаморфической переработки первичный протолит не всегда очевиден, но ясно установлено, что в строении структуры и отдельных ее участков принимают участие метавулканиды основного и среднего состава, глубоко метаморфизованные осадочно-вулканогенные и осадочные породы [Слабунов, 2008]. Обрамление структуры представлено интрузиями кислого и среднего состава, а основное рудопроявление связано с метаморфогенно-метасоматическими комплексами и метасоматитами, приуроченными к обрамлению структуры (метаморфитам по осадочно-вулканогенным и терригенным породам).

Метаморфизм и метасоматоз в пределах Хизоваарской структуры

Изучение метаморфизма и метасоматоза Хизоваарского рудного поля продолжалось на

протяжении долгого времени. В данный момент надежно установлены два этапа метаморфизма – лопийский (2,6–2,8 млрд лет) [Бибикина и др., 2003] и свекофенский (1,7–1,9 млрд лет) [Гродницкий, Сибелев, 1995]. Для оценки факторов рудоконтроля в пределах месторождения «Высота-181» важным является исследование более позднего свекофенского этапа. Разными исследователями в разные годы параметры свекофенского этапа метаморфизма оценивались приблизительно одинаково: $P \sim 6-7$ кБар и $T \sim 620-670^\circ$ [Бушмин, 1978; Бибикина и др., 2003; Володичев и др., 2011; Проскурин, 2014], что соответствует кианит-биотит-ставролитовой субфации амфиболитовой фации [Bushmin, Glebovitsky, 2016]. Отдельный интерес представляет изучение связанного с региональным метаморфизмом метасоматоза. С. А. Бушмин [1978] детализировал метасоматические колонки для гранатовых и безгранатовых

амфиболитов. В монографии, посвященной метасоматическим процессам, связанным с региональным метаморфизмом [Глебовицкий, Бушмин, 1983], рассмотрены варианты кислотного выщелачивания по различным типам пород Хизоваарской структуры. Надежно был установлен и описан механизм формирования в тыловых зонах кианитовых кварцитов, кварц-мусковитовых и кварц-мусковит-кианитовых сланцев. Данные комплексы пород являются рудоносными для месторождений северной части Хизоваарской структуры. Рудовмещающие породы месторождения «Высота-181» имеют схожие схемы возникновения, но отличаются высоким содержанием граната во всех метасоматических зонах. Гранатосодержащие метасоматиты месторождения описаны в диссертационной работе Г. Ю. Проскурина как принадлежащие к кислотным (биотит-ставролит-гранат-кварцевые и гранат-мусковит-кианит-кварцевые метасоматиты) и основным фациям (гранат-ставролит-биотит-амфиболовые, гранат-биотит-плагиоклазовые и гранат-кварцевые метасоматиты) [Проскурин, 2014]

Проявление «Высота-181»

Выделяются три группы метаморфических пород, развитых в пределах месторождения «Высота-181»: амфиболиты, в том числе гранатовые, амфиболсодержащие биотитовые гнейсы и гранат-биотитовые гнейсы. Необходимо отметить, что для амфиболсодержащих пород появление граната может быть следствием метасоматических процессов. Об этом свидетельствует отсутствие или незначительное содержание граната в амфиболитах, расположенных вне основной структуры месторождения. Наибольшее значение имеют распространенные в центре структуры гранат-биотитовые гнейсы и связанные с ними метасоматиты. С ними связано комплексное оруденение центральной линзы месторождения. Все породы в той или иной степени обладают признаками синхронных с метаморфизмом тектонических деформаций, амфиболиты при этом проявляют высокую устойчивость. В структуре этих пород явно различимы признаки пластичных и хрупких деформаций. Большое развитие получили кислотные метасоматиты, они и являются наиболее представительными рудовмещающими породами; основные метасоматиты редки и чаще всего характеризуются появлением ставролита. На рис. 2 приведены данные по петрографическому составу промежуточных и тыловых метасоматических зон, с которыми связано гранатовое, ставролитовое, кианитовое и мусковитовое оруденение. Гранат

проявлен достаточно широко и в метаморфических, и в метасоматических породах.

Занимающие центральную часть структуры Grt-Bt-гнейсы практически не представлены в виде метаморфического протолита. На всем протяжении центральной линзы выделены участки метасоматической переработки, в которых отчетливо прослеживается зональность. Несмотря на малый масштаб процессов, можно выделить определенные направления метасоматических изменений, которые отражаются в минеральном составе.

Метаморфические породы имеют следующий минеральный состав: амфиболиты (Amp+Pl+Qtz+Grt), биотит-амфиболовые гнейсы (Qtz+Pl+Amp+Bt), гранат-биотитовые гнейсы (Qtz+Pl+Bt+Grt).

Метасоматиты, развитые по различному субстрату, имеют составы, характеризующиеся высоким содержанием граната и кианита. Часто встречается ставролит и очень характерна более поздняя мусковитизация всех пород. Ниже представлена таблица 1, отражающая кислотный метасоматоз кианит-кварцевой фации.

В реальности часто наблюдаются процессы мусковитизации метасоматитов, связанные с мусковит-кварцевой фацией выщелачивания (рис. 3–5). В результате процесса формируются мусковит-гранатовые кварциты, представляющие большой интерес как комплексные руды. Подробное описание мусковит-кварцевой фации представлено в работе «Послемигматитовый метасоматоз» [Глебовицкий, Бушмин, 1983].

Для пород месторождения тыловые зоны кислотных метасоматитов часто содержат

Таблица 1. Метасоматическая колонка кислотных метасоматитов кианит-кварцевой фации по Grt-Bt-гнейсам (Qtz+Pl+Bt+Grt)

	Ф=Ki	Инертные компоненты
I	Qtz+Bt+Grt+St	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , FeO, MgO
II	Qtz+Ky+Grt Qtz+Ky+St	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , FeO
III	Qtz+Ky Qtz+Grt	SiO ₂ , Al ₂ O ₃
IV	Qtz	SiO ₂

Таблица 2. Метасоматическая колонка основных метасоматитов ставролит-гранатовой фации по Grt-Bt-гнейсам [Бушмин, Глебовицкий, 1983]

	Ф=Ki	Инертные компоненты
I	Qtz+Pl+Grt+St	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , FeO, CaO
II	Grt+St+Qtz	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , FeO
III	Grt+Qtz	SiO ₂ , Al ₂ O ₃
IV	Grt	Al ₂ O ₃ , MgO

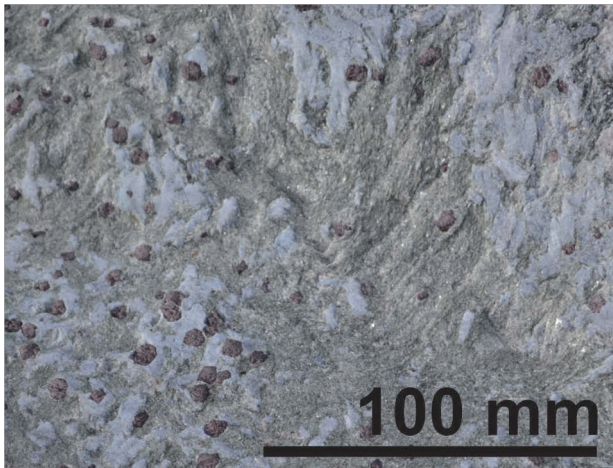


Рис. 3. Grt-Ms-Ky-Qtz-метасоматит

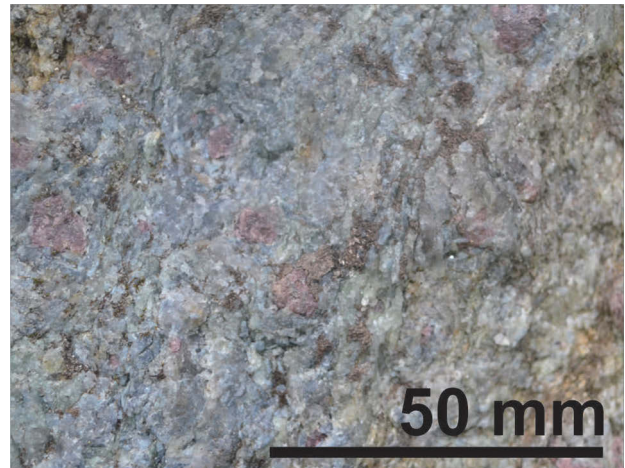


Рис. 4. Grt-Ky-Qtz-метасоматит с хрусталевидным кварцем

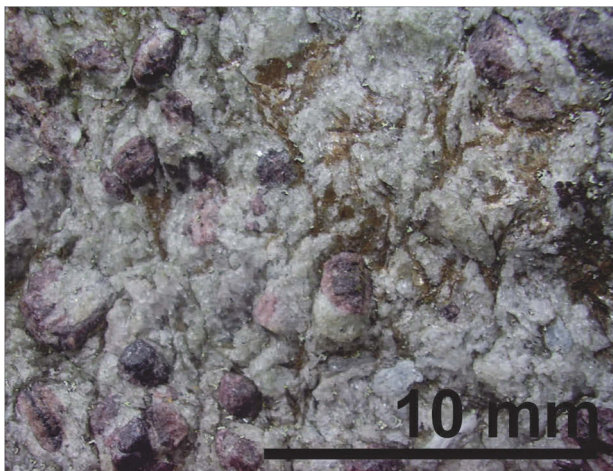


Рис. 5. Grt-Ms-Qtz-метасоматит тыловой зоны

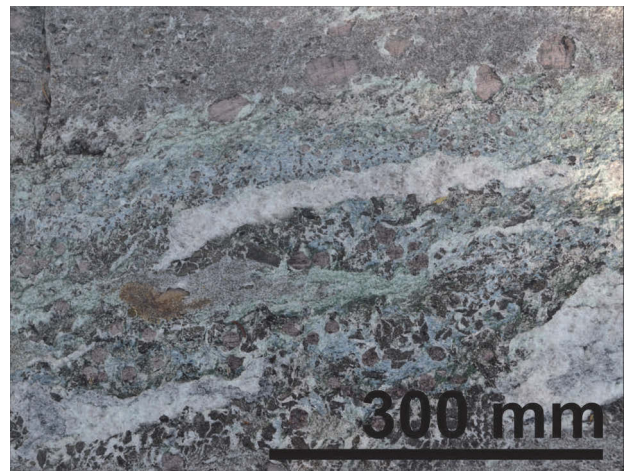


Рис. 6. Переход от Qtz-Grt-St-зоны с с/з St к Qtz-Ky-Grt-St-зоне с порфиробластическим St

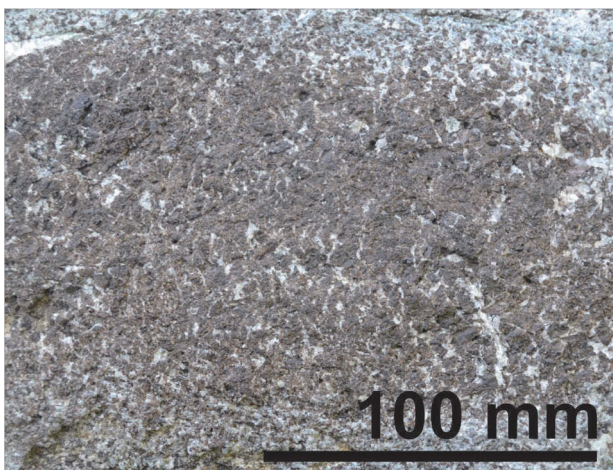


Рис. 7. St-метасоматит линзовидной формы

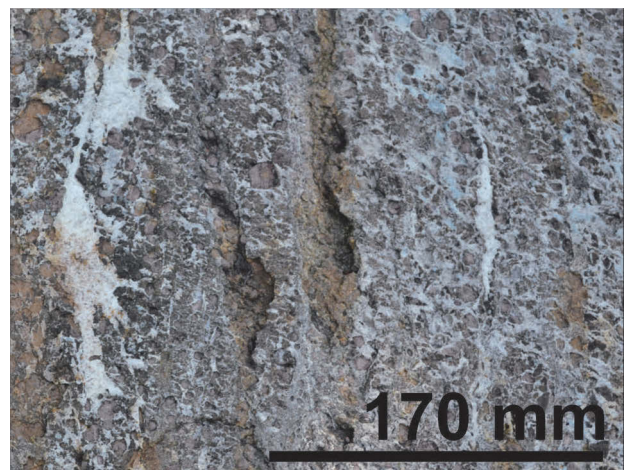


Рис. 8. Grt-St-Ky-Qtz-метасоматит

гранат, что может быть связано с сопряженным процессом железо-магнезиального метасоматоза. В крайних случаях наблюдаются линзы и жилы анхимоминеральных гранатитов среди кварцевых метасоматитов тыловых

зон. В породах во время минералогического картирования четко зафиксированы процессы возникновения ставролита и его исчезновения с замещением на кианит (с образованием псевдоморфоз в гранатовых зернах). Наибольшее

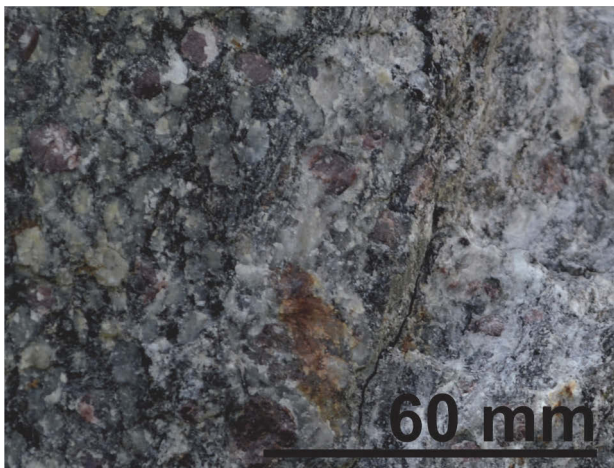


Рис. 9. Grt-Bt-гнейсы неизмененные

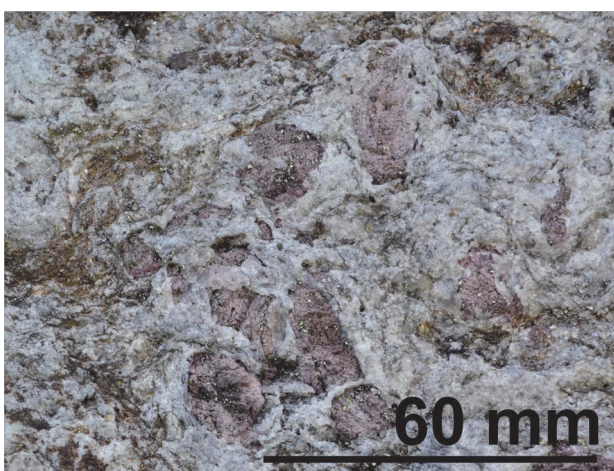


Рис. 10. Grt промежуточной зоны скелетный (до 18 см)

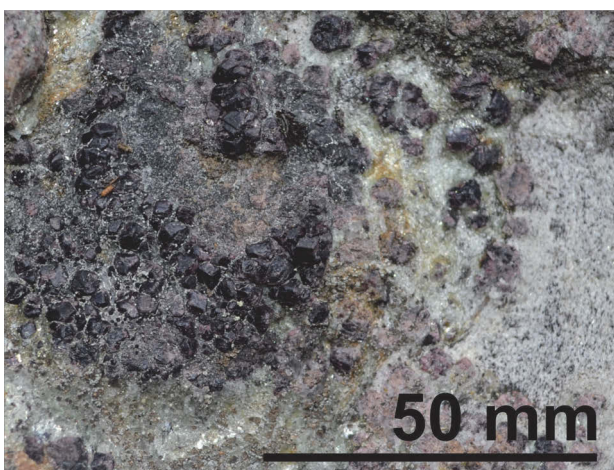


Рис. 11. Grt тыловых зон (0,5–2 см)

содержание граната и ставролита связано с основными метасоматитами ставролит-гранатовой фации (табл. 2).

Как и в случае с кислотным метасоматозом, Grt проявлен практически во всех зонах в виде порфиробластов, размер его зерен

существенно меньше (до 5 см) и реже наблюдаются скелетные формы. Очень часто наблюдается развитие поздних кислотных метасоматитов, характерных для Хизоваарской структуры [Проскурин, 2014] и приводящих к формированию метасоматических зон Qtz-Ky-Grt-St-, Qtz-Grt-Ky- и Qtz-Ky-состава (рис. 6–8).

Повсеместно проявлены процессы Fe-Mg-метасоматоза, результатом которых является возникновение граната даже в комплексах, приуроченных к тыловым зонам кислотного выщелачивания. Типоморфные разновидности кристаллов граната представлены на рисунках 9–11.

В реальной обстановке бывает сложно разделить метасоматиты, развитые по разным метаморфическим породам, из-за схожести состава промежуточных зон. Минеральный состав наиболее распространенных рудовмещающих пород, выявленных на основании минералого-технологического картирования (с пробным обогащением), выглядит следующим образом (сводная схема для центральной линзы, ассоциированной с Grt-Bt-гнейсами):

1. Qtz+Pl(n~66)+Grt+Bt. Гранат-биотитовые гнейсы, часто прослеживается образование мусковита в незначительных концентрациях. Из промышленных минералов содержит гранат. В пределах комплекса этих пород был заложен один из опытных карьеров с последующей разработкой схемы обогащения гранатовых руд как единственного полезного компонента [Щипцов и др., 2009].

2. Qtz+Pl+Bt+Ms+Grt+St. Для пород зоны характерно чередование Grt-St-Ms-Qtz и Grt-Bt-Ms-Qtz метасоматитов, при этом биотит отчетливо исчезает в существенно более мусковитовых или более ставролитовых зонах. Содержание граната, как правило, высокое.

3. Qtz+Ky+Grt+St и Qtz+Ms+Ky+Grt+Bt. Метасоматиты промежуточных зон содержат характерные ассоциации Grt+St, St+Ky, Grt+Ms+Ky. Такие минеральные ассоциации могут формироваться в колонках как кислотных, так и основных метасоматитов. Начало формирования кианита связано с этими комплексами, но максимального содержания он достигает лишь в тыловых зонах. Промежуточные зоны наиболее интересны для комплексного изучения руд, содержат полезные компоненты в различных взаимоотношениях и наиболее распространены в пределах месторождения (более 50 % по площади от основной линзы и более 60 % по объему надежно разведанных запасов).

4. Qtz+Ky+Grt и Qtz+Ms+Grt. Тыловые зоны характеризуются возникновением существенно кварцевых пород с порфиробластическим

гранатом, чешуйчатым мусковитом и неяснозернистым кианитом. Комплекс Gr-Ms-Qtz-метасоматитов был изучен во время опробования второго опытного карьера [Щипцов и др., 2009].

5. Grt+Qtz, Ky+Qtz и Ms+Qtz. Породы тыловых зон характеризуются биминеральным составом, содержание граната, кианита и мусковита в них последовательно уменьшается. Наиболее распространены Grt-Qtz-метасоматиты с порфиروبластическим мелко- и среднезернистым гранатом. Также в этих зонах возникают линзы и жилы гранатитов. Породы зон перспективны для добычи граната и в некоторых случаях мусковита.

6. Qtz. Мономинеральные метасоматические кварциты встречаются редко в пределах месторождения, чаще всего в виде маломощных линз.

Тектонические деформации

Наиболее интенсивные тектонические деформации развиты по простиранию 80°. При этом есть признаки катакластических деформаций крупных порфиробластов граната (рис. 12) и синхронное с этим появление кристаллобластов граната другой генерации (рис. 13). Структурные изменения представлены в основном милонитизацией с постепенным (по зонам) замещением биотита мусковитом (рис. 14).

Очевидно, что интенсивность метасоматических процессов в большинстве случаев определяется активностью тектонических деформаций. Практически всегда в зонах расланцевания наблюдаются процессы метасоматоза мусковит-кварцевой фации, приводящие к образованию богатых мусковитом (до 30 %) участков.

Рудоконтролирующие факторы

В первую очередь необходимо отметить, что литологические и петрологические рудоконтролирующие факторы дают прямую зависимость характера оруденения от петрографического состава. Основной тип руд месторождения – гранатовые с сопутствующими промышленными минералами: кианитом, ставролитом, мусковитом. Гранат встречается во всех рудах месторождения, в том числе в анхимоминеральных разновидностях. В комплексных рудах наиболее часто он находится в ассоциации с кианитом и ставролитом, либо в ассоциации с мусковитом. Результаты минералого-технологического картирования (опробование, проводимое по профилям и на

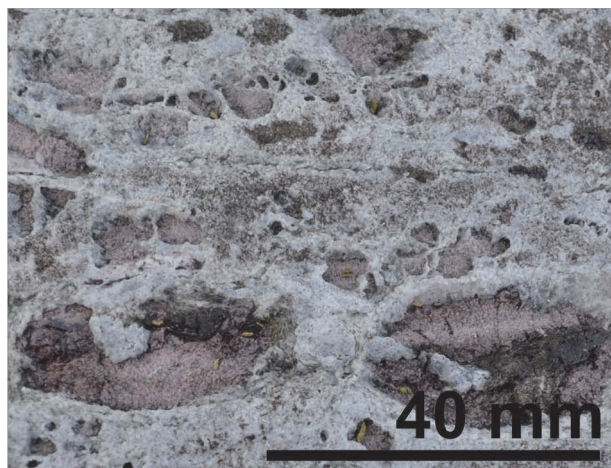


Рис. 12. Порфиробласты граната в микроскладчатой зоне

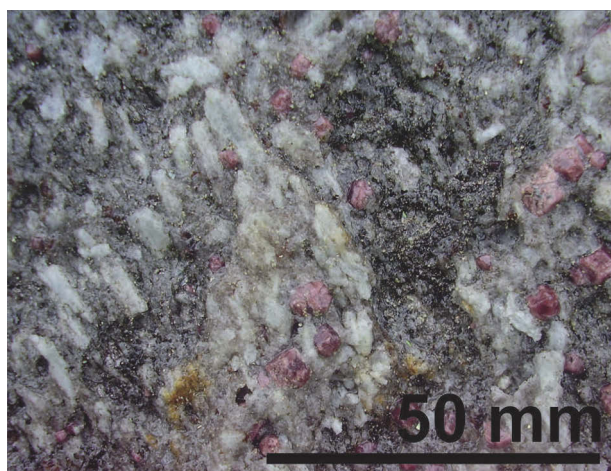


Рис. 13. Новообразованный Grt в Bt-Ms-Qtz-метасоматите

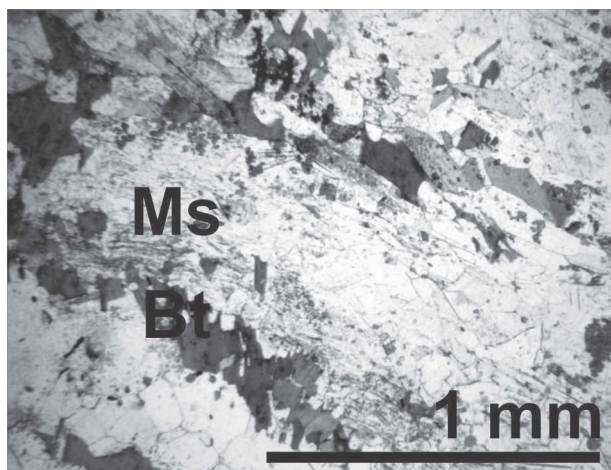


Рис. 14. Bt-Ms-Qtz-милонит

площадках статистики, и опытное обогащение) показывают наличие трех основных типов руд – гранатовые, ставролит-кианит-гранатовые и мусковит-гранатовые. Встречаются также кианитовые и мусковитовые метасоматиты, не

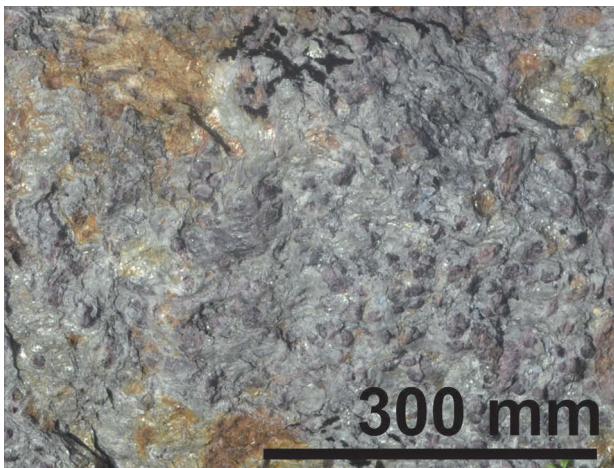


Рис. 15. Grt-Ky-Ms-Qtz-метасоматит

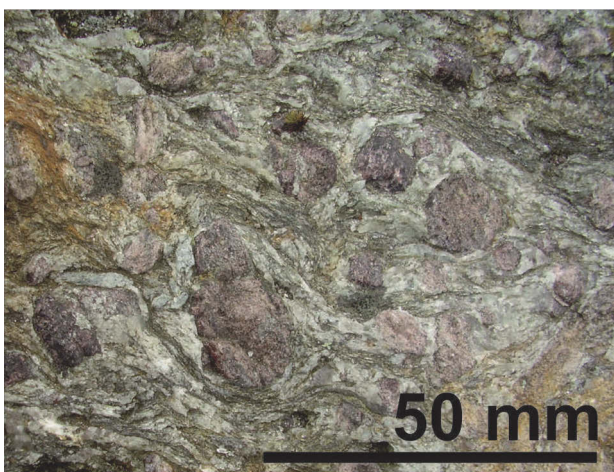


Рис. 16. Grt-Ms-Qtz-метасоматит промежуточной зоны

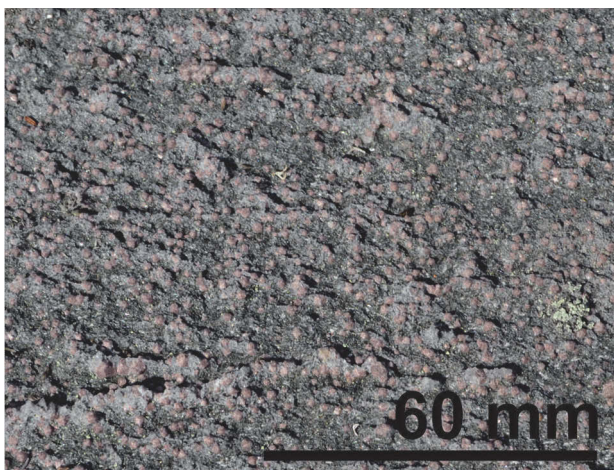


Рис. 17. Grt-амфиболит с признаками метасоматической структуры порфиробластов Grt

имеющие широкого распространения в пределах месторождения.

Ставролит-кианит-гранатовые руды представлены метасоматитами, развитыми по амфиболсодержащим и гранат-биотитовым гнейсам,

при этом в метасоматитах по амфиболовым гнейсам наблюдаются наиболее богатые ставролит-кианит-гранатовые и кианит-гранатовые руды. К данному типу руд относятся и метасоматические зоны, вмещающие Grt-Ky-Ms-Qtz-ассоциацию, наиболее распространенную в пределах месторождения (рис. 15). Руды данного состава чаще могут быть связаны как с кислотным, так и с основным метасоматозом, но наибольшее содержание кианита наблюдается в предтыловых зонах кислотного метасоматоза Ку субфации.

Мусковит-гранатовые руды развиты по гранат-биотитовым и амфибол-биотитовым гнейсам (рис. 16). С амфибол-биотитовыми гнейсами ассоциированы зоны Grt-Ky-Ms-St-Qtz-метасоматитов. С Grt-Bt-гнейсами связаны наиболее обширные зоны Grt-Ms-Qtz-метасоматитов с порфиробластическим гранатом 5–20 мм.

Grt-руды представлены тремя типами пород: гранатовыми амфиболитами (рис. 17), основными метасоматитами ставролит-гранатовой субфации по всем типам протолита и анхимомономинеральными гранатитами, формирующимися при Fe-Mg метасоматических процессах и пространственно связанными с зонами контакта гранатовых амфиболитов и высокоглиноземистых пород.

В таблице 3 указаны минералогические анализы для Grt-Bt-гнейсов и апогнейсовых метасоматитов (см. сводную схему и табл. 1 и 2). Отчетливо виден рост содержания кианита и мусковита по мере продвижения от передовых зон к тыловым, вариации содержания граната в различных по составу (преимущественно Grt-St либо Bt-Ms) зонах, появление и исчезновение St. Промежуточные зоны (2-3) наиболее неоднородны по содержанию промышленных минералов. В тыловых зонах (4-5) общее содержание промышленных минералов, как правило, не такое высокое, как в промежуточных, но преобладают биминеральные и мономинеральные руды.

Можно выделить следующие группы факторов контроля руд в пределах месторождения.

1. Литологические факторы

Пространственная связь с толщами амфиболовых гнейсов (вмещающие породы).

Пространственная связь рудных тел с метаморфическими породами является важнейшим геологическим признаком, относящимся к литологическим факторам контроля руд. Данные о вмещающих руды породах используются при первичном картировании и геометризации рудных залежей, выявлении закономерностей оруденения. Для исследуемого участка

Таблица 3. Минералогия рудовмещающих комплексов, ассоциированных с метасоматической зональностью

Состав пород	Зональность	Grt %	St %	Qtz %	Pl %	Ms %	Bt %	Ky %
Qtz-Pl-Grt-Bt	1	20,6	1	50	21,1	0,03	5,53	0
Qtz-Pl-Bt-Grt	1	8,1	0	50,7	23,2	1	13,2	0
Qtz-Pl-Bt-Grt	1	7,2	0,6	50,7	27,8	3,1	8,9	1,2
Qtz-Grt-Pl-Ky	2	22,86	1,95	43,84	12,74	3,77	1,82	11,46
Qtz-Grt-Pl-Ms-St-Ky	2	11,8	6,2	56,5	8,2	8,1	1,2	5,3
Qtz-Grt-Pl-Ms	2	9,2	0	55,4	17,7	12	2,4	0
Qtz-Grt-Ky-Bt-Pl	2	29,7	4,3	37,2	6,1	2,1	6,6	11,8
Qtz-Grt-Pl-Ms	2	13,1	0	64,7	9,1	7,7	4,2	0
Qtz-Ky-Pl-Grt-Bt	2	12,7	1,8	42,4	14,9	2,6	5,8	18,5
Qtz-Ky-Grt-Ms-Pl	3	11,6	0,8	45,8	9	9,8	4,2	16,5
Qtz-Grt-Ms-Pl	3	24,8	0	46,9	9,5	12,7	1,5	3,2
Qtz-Ky-Grt	3	15,6	0	47,5	8	2,1	1,5	23
Qtz-Ms-Grt-Pl	3	9,2	0	65,4	6,9	14,8	2,8	0
Qtz-Grt-Ms-Pl	3	13,8	1,1	65,8	5,2	6,4	1,8	4,2
Qtz-Ky-Ms-Pl	3	13,1	2,8	50,1	5,1	8,9	2,7	15,1
Grt-Qtz-Ky-St	3	35,5	13	31,7	0,2	0,5	0,1	14,4
Qtz-Ms-Ky-Grt	3	9,02	0,43	40,27	0	24,83	3,82	20,6
Qtz-Grt-Ky-St	3	21,94	5,16	51,09	0	3,05	0,1	17,1
Qtz-Ky-Grt	4	13,4	1,2	46,8	4,2	1,9	0,3	30
Ms-Qtz-Ky-Grt	4	7,26	2,4	17,25	0	58,06	0,43	12,0
Qtz-Ms-Ky	4	3,25	0,86	51,48	0	28,8	4,8	10,47
Grt-Qtz	5	58,53	0,13	26,67	4,96	0,93	0	1,88

Таблица 4. Нормализованные результаты микрозондовых анализов для зерен граната

	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MnO	Fe _n O _m
Grt I	3,07	20,39	35,59	4,10	0,94	35,92
Grt II	2,45	20,67	35,87	5,68	0,90	34,42
Grt III	4,78	20,27	35,64	4,84	0,95	33,51
Grt IV	4,19	21,22	36,33	6,23	1,21	30,82
Grt V	3,58	20,93	35,93	5,65	0,68	33,24
Grt VI	4,09	20,81	36,25	5,90	1,15	31,81

в силу активных метасоматических процессов характер вмещающих пород не всегда коррелирует с конкретными типами руд. Амфиболовыми гнейсами в работе называется ряд пород с преимущественным содержанием Amph, Bt и Pl ($n > 70$). Толщи данных пород занимают западную и северо-западную часть структуры.

Пространственная связь с толщами гранатовых амфиболитов (вмещающие породы). Безгранатовые амфиболиты развиты широко в обрамлении месторождения. В пределах структуры и на контактах с другими комплексами получили развитие гранатосодержащие амфиболиты, что может говорить о появлении граната как о метасоматическом признаке. Метасоматиты, имеющие в качестве исходного субстрата амфиболиты, встречаются редко и приурочены к тектоническим несогласиям. Как следствие, промежуточные зоны имеют небольшую мощность и наблюдаемые

метасоматиты имеют состав полиминеральных вторичных кварцитов.

Пространственная связь с толщами гранат-биотитовых гнейсов (вмещающие породы). Гранат-биотитовые гнейсы являются основной рудовмещающей и наиболее метасоматически измененной породой. Занимают центральную часть месторождения, ярко выражены в рельефе и хорошо обнажены. По Grt-Bt-гнейсам сформировано наиболее значимое оруденение Grt-St-Ky- и Grt-Ms-метасоматитов.

2. Петрологические факторы

Региональный метаморфизм. Важно отметить, что формирование существующих рудных комплексов связано с более поздним этапом (~1,8 млрд лет), который и будет рассматриваться в качестве метаморфического фактора контроля руд. Результаты

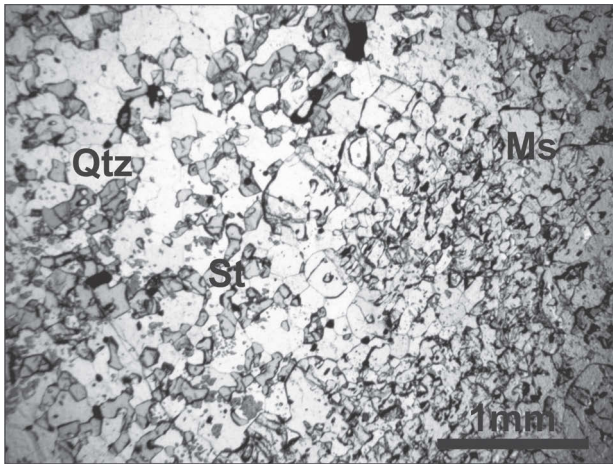


Рис. 18. Формирование скелетного ставролита (ставролитовая субфа́ция)

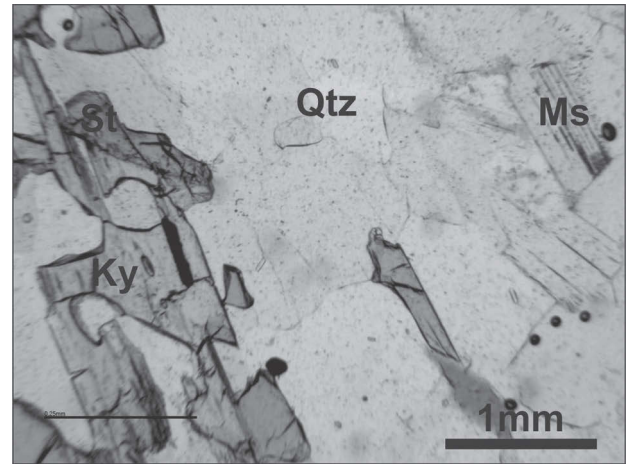


Рис. 19. Замещение St кианитом

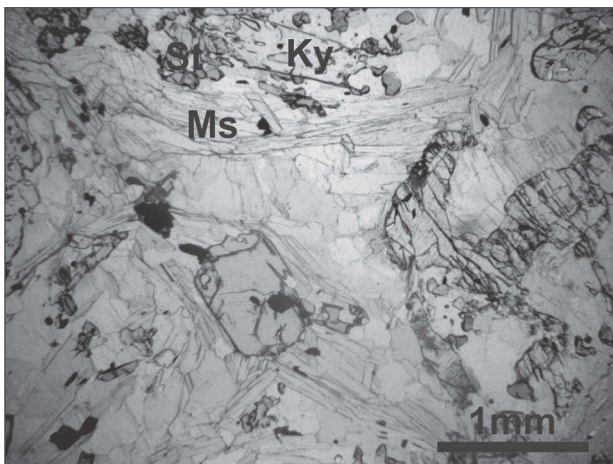


Рис. 20. Ky-Ms-Qtz-метасоматит и реликты St (кислотная фа́ция, замещение St кианитом)

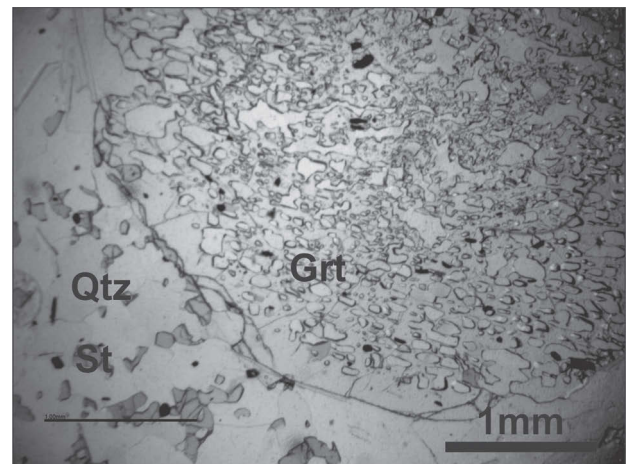


Рис. 21. Реликты скелетного ставролита и скелетный гранат

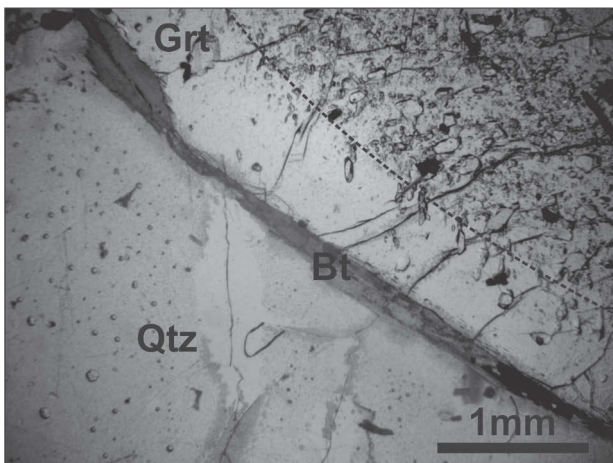


Рис. 22. Зональность граната промежуточной зоны

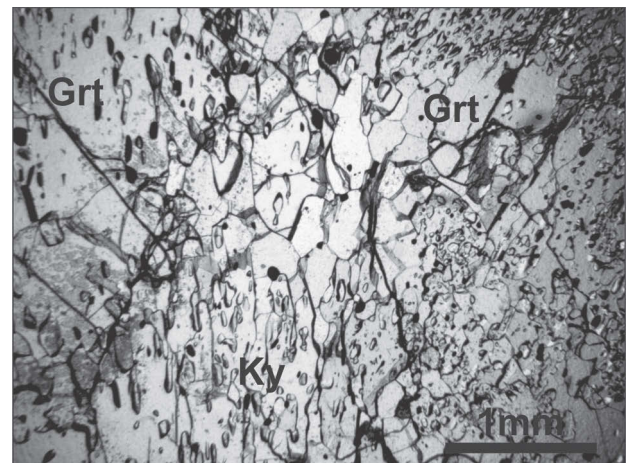


Рис. 23. Grt-Ky-Qtz-метасоматит

мультиравновесной барометрии с использованием программного комплекса TWQ показывают для гранатовых амфиболитов и гранат-биотитовых гнейсов $P > 6,0$ кБар и T 590 и 630 °С соответственно (средние значения), что позволяет отнести условия их образования

к биотит-кианит-гранат-калишпатовой субфа́ции амфиболитовой фа́ции на основе схемы фа́ций [Глебовицкий, Бушмин, 2009]. К промышленным минералам, сформировавшимся в результате свекофенского метаморфизма, относится гранат из гранат-биотитовых

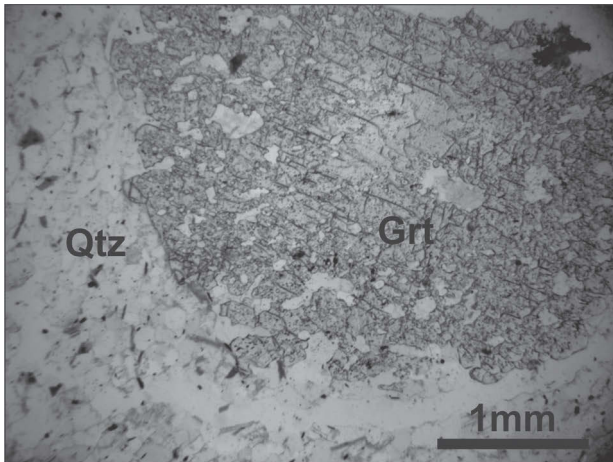


Рис. 24. Гранат предтыловой зоны Grt-Qtz-состава

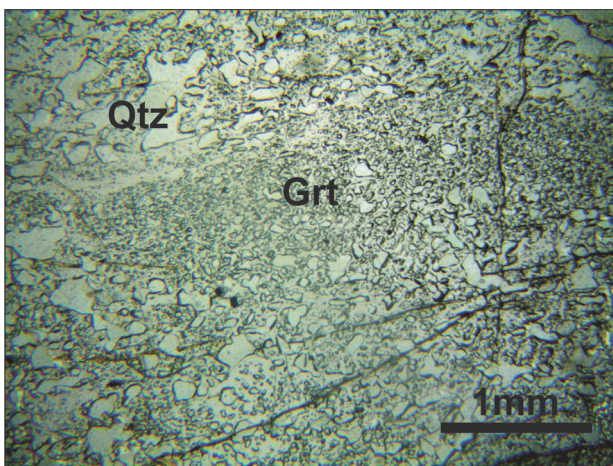


Рис. 25. Скелетный гранат промежуточной зоны гранат-ставролитовой субфации

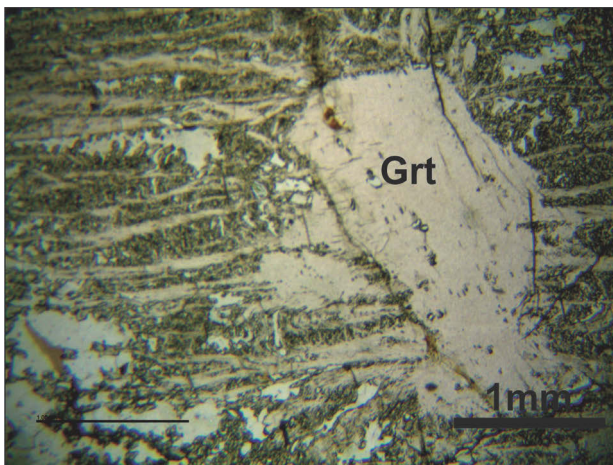


Рис. 26. Гранатит

гнейсов и гранатовых амфиболитов. Фактор метаморфизма наиболее обширный и явно характерный для всех пород месторождения, но не является первым по значимости для существующих рудных тел, так как их формирование во многом (более 70 % по объему для гранатовых руд, ~100 % для кианитовых, мусковитовых

и ставролитовых) связано с метасоматическими процессами.

Многостадийный кислотный метасоматоз кианит-кварцевой и мусковит-кварцевой фаций и основной метасоматоз ставролит-гранатовой фации. Проявлен повсеместно и является главным фактором формирования руд. Признаками метасоматического процесса являются: метасоматическая зональность, характерная линзовидная и жильная морфология, наличие реликтов пород протолита, порфиробласты граната и кианита, гранобластовые структуры пород, псевдоморфозы (в основном кианита по ставролиту и кварца по кианиту), зональность минералов и анхимономинеральные породы, приуроченные к тыловым зонам (рис. 18–26). Разделять процессы кислотного и основного метасоматоза не имеет смысла, так как чаще всего они формируют единые комплексы пород с частым чередованием рудоносных зон разного состава. В работе не рассматриваются редкие и локальные проявления основного метасоматоза амфибол-кианитовой фации как не имеющие значения в перспективе разработки месторождения. Процессы возникновения Ms-оруденения связаны с метасоматозом мусковит-кварцевой фации [Бушмин, Глебовицкий, 1983].

Fe-Mg метасоматоз, сопряженный с кислотным выщелачиванием. Данный процесс хорошо описан для метасоматитов Хизоваарской структуры и участка «Высота-181» в нескольких работах [Бушмин, 1978; Проскурин, 2014]. В аспекте рассматриваемой проблемы процесс интересен формированием анхимономинеральных гранатитов в виде жильных и линзовидных тел, часто приуроченных к контактам между породами протолита (рис. 26). Для месторождения «Высота-181» данный факт может объясняться дебазификацией железистых и магнезиальных глубинных метаморфитов. В таблице 4 представлены средние нормализованные результаты микрозондовых анализов для зерен граната из различных метасоматических зон. Выбирались только средние значения для внешних зон полнокристаллических гранатов, так как внутренняя метаморфическая зона и ядро часто сохраняются в промежуточных и тыловых зонах.

Grt I – Гранатовый амфиболит (метаморфическая порода)

Grt II – Grt-Vt-гнейс (метаморфическая порода)

Grt III – тыловая зона метасоматоза по гранатовому амфиболиту (кислотная фация)

Grt IV – тыловая зона метасоматоза по Amph-Vt-гнейсу (основная фация)

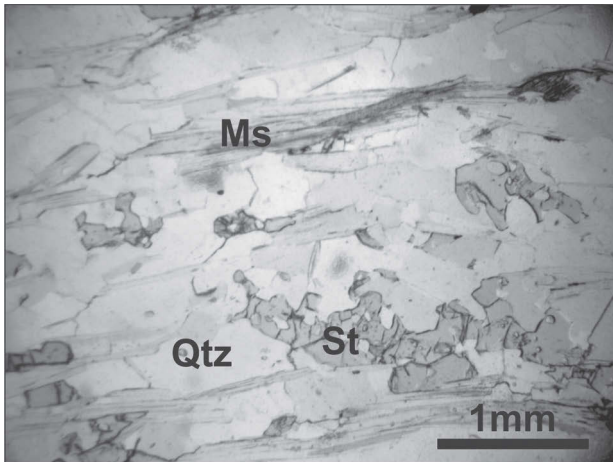


Рис. 27. Грубозернистый милонит с реликтами St

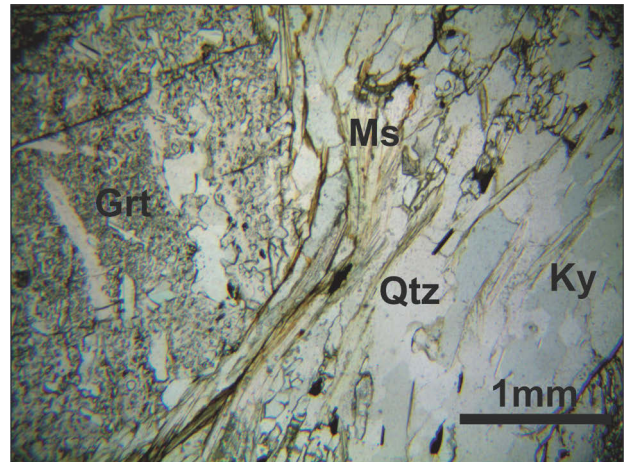


Рис. 28. Порфиробласт граната и начальная стадия милонитизации

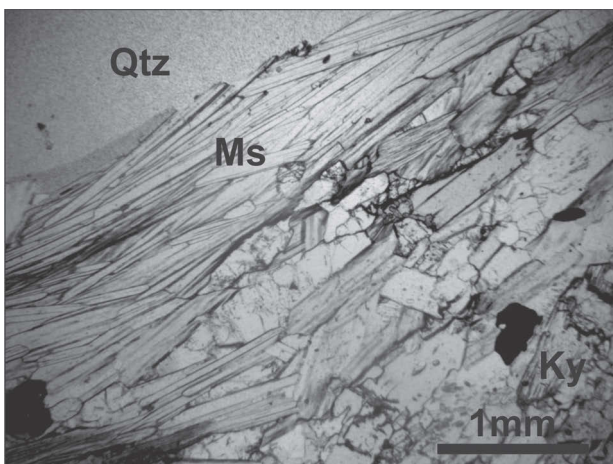


Рис. 29. Тонкий мусковитовый милонит

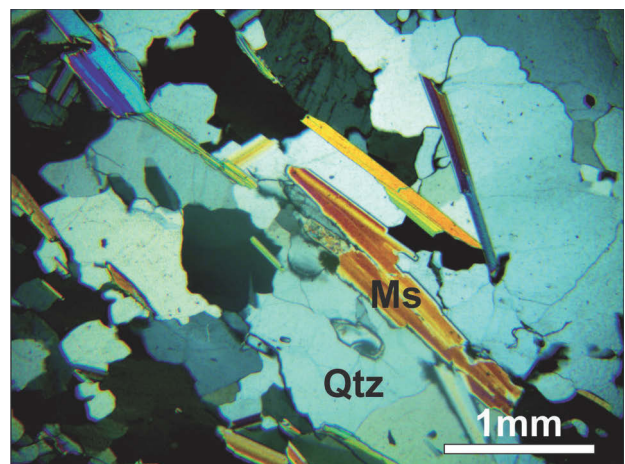


Рис. 30. Ms-Qtz-метасоматит (×)

Grt V – тыловая зона метасоматоза по Grt-Bt-гнейсу (кислотная фация)

Grt VI – анхимономинеральный гранатит (основная фация).

Четко видны отличия гранатов, сформированных в процессе основного метасоматоза ставролит-гранатовой фации, от остальных типов – повышенное содержание Ca, Mn и Mg и пониженное содержание Fe. Это может говорить о высокой подвижности Mg при относительной инертности Fe, что уже было описано для Хизоварской структуры [Глебовицкий, Бушмин, 1983]. Повышенное содержание кальция соответствует представлениям о фациях основного метасоматоза и упоминалось как следствие базификации пород месторождения [Проскурин, 2014].

3. Структурные факторы

Синхронные с метасоматозом тектонические процессы милонитизации. К тектоническим зонам приурочены наиболее

характерные метасоматиты тыловых зон, чаще всего с высоким содержанием мусковита. Это указывает на синхронность тектонического и метасоматического преобразования пород и высокую проницаемость тектонических зон для раствора. В качестве рудоконтролирующего фактора тектоника характерна для слюдястых и слюдосодержащих милонитов и бластомилонитов, чаще всего гранатовых (рис. 27–30).

Анализ данных, сведенных в таблицу 5, показывает некоторые важные закономерности: Ky-St-руды с наибольшим содержанием данных минералов формируются в результате как основного метасоматоза, так и кислотного выщелачивания. Ms-руды формируются в результате кислотного метасоматоза мусковит-кварцевой фации в основном по протолиту Grt-Bt-гнейсов. Grt-оруденение характерно для метаморфических пород: Grt-амфиболитов и Grt-Bt-гнейсов и метасоматитов по ним. Также формирование Grt происходит на участках Fe-Mg-метасоматоза (сбросовый процесс).

Таблица 5. Применимость факторов контроля для описания и геометризации типов руд

Факторы контроля руд	Комплексное оруденение		
	Ky-St	Ms	Grt
1. Литологические факторы			
пространственная связь с толщами Amph-гнейсов	++	+	-
пространственная связь с толщами Grt-амфиболитов	+	-	++
пространственная связь с толщами Grt-Bt-гнейсов	+	++	++
2. Петрологические факторы			
свекофеннский метаморфизм амфиболитовой фации с параметрами $T \sim 650^\circ$, $P \sim 5-6$ кБар (прослеживается для оруденения, связанного с метаморфитами без явных наложенных метасоматических процессов)	-	-	++
основной метасоматоз ставролит-гранатовой фации	++	-	++
кислотный метасоматоз кианит-кварцевой фации	++	+	+
кислотный метасоматоз мусковит-кварцевой фации	-	++	-
Fe-Mg-метасоматоз, сопряженный с кислотным выщелачиванием, формирующий анхимономинеральные линзы гранатитов	-	-	++
3. Структурные факторы			
сдвиговые пластичные синметаморфические деформации с активной милонитизацией	-	++	-

Примечание. (-) – нехарактерно, (+) – характерно, (++) – наиболее характерно.

Описанные типы руд практически никогда не встречаются в чистом виде, что приводит к формированию комплексных руд.

Заключение

Основные факторы контроля комплексных гранатовых руд месторождения «Высота-181» относятся к группам литологических и петрологических. Главным фактором можно считать кислотный метасоматоз кианит-кварцевой серии и основной ставролит-гранатовой серии, приводящий к формированию Grt-St-Ky-Ms-Qtz- и Grt-Ms-Qtz-метасоматитов, занимающих более 45 % объема всех руд месторождения. При этом для многих руд тыловых зон метасоматоза приуроченность к тому или иному типу протолита теряет свою значимость в силу единообразия состава. Исключением могут служить линзы и жилы анхимономинеральных гранатитов, формирование которых связано с Fe-Mg-метасоматозом. Такие тела обычно приурочены к контактам между метаморфическими комплексами и тектоническим несогласиям. Установлено, что содержание кианита максимально в предтыловых зонах по мало-слюдистым комплексам. В дальнейшем, при подвижности Al_2O_3 , формируются либо анхимономинеральные кварциты, либо гранат-кварцевые комплексы, связанные со сбросовыми процессами Fe-Mg-метасоматоза. В схеме метасоматоза мусковит-кварцевой фации, включающей сохранение слюд, содержание кианита также может быть значительным, но важным промышленным минералом в тыловых зонах

является мусковит. Формирование граната связано со следующими процессами: метаморфизм, метасоматоз кислотной и основной фаций и Fe-Mg-метасоматоз. Результаты работы могут быть использованы для уточнения характеристик месторождения «Высота-181», на данный момент описываемого как проявление гранатовых руд [Щипцов и др., 2009]. Также можно с высокой надежностью предположить, что выявленные факторы контроля руд являются общими для всех объектов Хизоваарского рудного поля и частично применимы при изучении рудных комплексов метаморфогенных месторождений, сформированных в условиях регионального метаморфизма Фенноскандинавского щита.

Работа выполнена в рамках тем НИР ПФНИ ГАН «Научное обоснование потенциала георесурсов нетрадиционных и новых промышленных минералов и горных пород Карелии при их комплексной оценке» (№ госрег. АААА-А16-116020410115-2).

Литература

- Бибикова Е. В., Самсонов А. В., Щипанский А. А., Грачева Т. В., Макаров В. А. Хизоваарская структура Северо-Карельского зеленокаменного пояса как акретированная островная дуга позднего архея: изотопно-геохронологические и петрологические данные // Петрология. 2003. Т. 11, № 3. С. 289–320.
- Борисов П. А., Волотовская Н. А. Хизоваарское месторождение кианита в КФ ССР // Сов. геология. 1941. № 6. С. 8–26.

Бушмин С. А. Метасоматиты месторождения Хизоваара (Северная Карелия) // Изв. АН СССР. Сер. Геология. 1978. № 7. С. 127–138.

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, 2011. С. 49–55.

Волотовская Н. А., Жиров К. К. Хромсодержащие минералы свиты Хизоваара // Изв. Карело-Фин. науч.-исслед. базы АН СССР. Петрозаводск: Карело-Фин. база АН СССР, 1948. С. 41–53.

Геологическая съемка метаморфических и метасоматических комплексов. СПб.: ВСЕГЕИ, 1996. 416 с.

Глебовицкий В. А., Бушмин С. А. Метаморфический контроль рудных месторождений // Минерогения докембрия: Мат. всерос. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. С. 49–50.

Глебовицкий В. А., Бушмин С. А. Послемигматитовый метасоматоз. Л.: Наука, 1983. 216 с.

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. С. 26–32.

Никифоров А. Г. Корреляция результатов минерало-технологического картирования с геологическими условиями участка «Высота-181» // Сб. ст. IX Российского семинара по технологической минералогии, Магнитогорск. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 172 с.

Проскурин Г. Ю. Метасоматиты Тикшеозерского зеленокаменного пояса: Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. СПб., 2014. 222 с.

Слабунов А. И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 296 с.

Щипцов В. В. Технологическая минералогия индустриальных минералов Карелии // Минералогия, петрология и минерогения докембрийских комплексов Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 119–123.

Щипцов В. В., Сыстра Ю. Й., Щипцова Н. И., Кулмала Т. К., Бородулин Ю. Д., Скамницкая Л. С., Захарова И. Б., Морозов Г. Г., Каненкова Е. А., Байбусинов Ш. Ш. Хизоваарское кианитовое поле (Северная Карелия). Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1988. 105 с.

Щипцов В. В., Бубнова Т. П., Скамницкая Л. С., Гаранжа А. В., Ручьев А. М. Гранатовые руды Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. 208 с.

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. Vol. 126, no. 1/2. P. 25–37.

Berman R. G., 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. Vol. 126. P. 1–22.

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 КарНЦ РАН. 2016. № 2. doi: 10.17076/geo265

Kretz R. Symbols for rock-forming minerals // American Mineralogist. 1983. Vol. 68. P. 277–279.

Поступила в редакцию 24.05.2017

References

Bibikova E. V., Samsonov A. V., Shchipanskii A. A., Gracheva T. V., Makarov V. A. Khizovaarskaya struktura Severo-Karel'skogo zelenokamennogo poyasa kak akkretirovannaya ostrovnaya duga pozdnego arkheya: izotopno-geokhronologicheskie i petrologicheskie dannye [The Hisovaara structure in the Northern Karelian greenstone belt as a Late Archean accreted island arc: isotopic geochronological and petrological evidence]. *Petrologiya* [Petrology]. 2003. Vol. 11, no. 3. P. 289–320.

Borisov P. A., Volotovskaya N. A. Khizovaarskoe mestorozhdenie kianita v KF SSR [The Hisovaara kyanite deposit in the Karelo-Finnish SSR]. *Sov. geologiya* [Soviet Geology]. 1941. No. 6. P. 8–26.

Bushmin S. A. Metasomatity mestorozhdeniya Khizovaara (Severnaya Kareliya) [Metasomatites of the Hisovaara deposit (North Karelia)]. *Izv. AN SSSR. Ser. Geologiya* [Proceed. AS USSR. Ser. Geol.]. 1978. No. 7. P. 127–138.

Geologicheskaya s'emka metamorficheskikh i metasomaticheskikh kompleksov [Geological surveying of metamorphic and metasomatic complexes]. St. Petersburg: VSEGEI, 1996. 416 p.

Glebovitskii V. A., Bushmin S. A. Metamorficheskii kontrol' rudnykh mestorozhdenii [Metamorphic control of ore deposits]. *Minerageniya dokembriya: Mat. vseross. konf.* [The Minerageny of the Precambrian Period: Proceed. of the All-Russ. Conf.]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2009. P. 49–50.

Glebovitskii V. A., Bushmin S. A. Poslemigmatitovyi metasomatoz [The postmigmatitic metasomatism]. Leningrad: Nauka, 1983. 216 p.

Grodnitskii L. L., Sibelev O. S. Pozdnesvekofennskii etap regional'nogo metamorfizma, metasomatoza, pегmatito- i rudoobrazovaniya na territorii Karelii i yugozapadnoi chasti Kol'skogo poluostrova [The Later Svecofennian stage of regional metamorphism, metasomatism, pegmatite- and ore-forming processes in the territory of Karelia and the south-west of the Kola peninsula]. *Zap. VMO* [Proceed. of the Russ. Mineral. Society]. 1995. No. 3. P. 26–32.

Nikiforov A. G. Korrelyatsiya rezul'tatov mineralogotekhnologicheskogo kartirovaniya s geologicheskimi usloviyami uchastka "Vysota-181" [The correlation of the results of the mineralogical and technological mapping with the geological conditions of the Vysota-181

section]. *Sb. st. IX Rossiiskogo seminaro po tekhnologicheskoi mineralogii, Magnitogorsk* [Proceed. of IX Russ. Seminar on Technological Mineralogy, Magnitogorsk]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2015. 172 p.

Proskurin G. Yu. Metasomatity Tiksheozerskogo zelenokamennogo poyasa [Metasomatites of the Lake Tikshozero greenstone belt]: Summary of PhD (Geol.-Min) thesis. St. Petersburg, 2014. 222 p.

Shchiptsov V. V. Tekhnologicheskaya mineralogiya industrial'nykh mineralov Karelii [Technological mineralogy of industrial minerals in Karelia]. *Mineralogiya, petrologiya i minerageniya dokembriiskikh kompleksov Karelii* [Mineralogy, Petrology, and Minerageny of the Precambrian Complexes in Karelia]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2007. P. 119–123

Shchiptsov V. V., Bubnova T. P., Skamnitskaya L. S., Garanzha A. V., Ruch'ev A. M. Granatovye rudy Karelii [Garnet ores of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2009. 208 p.

Shchiptsov V. V., Systra Yu. I., Shchiptsova N. I., Kulmala T. K., Borodulin Yu. D., Skamnitskaya L. S., Zakharova I. B., Morozov G. G., Kanenkova E. A., Baibusinov Sh. Sh. Khizovaarskoe kyanitovoe pole (Severnaya Kareliya) [The Hisovaara kyanite field (North Karelia)]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 1988. 105 p.

Slabunov A. I. Geologiya i geodinamika arkheiskikh podvizhnykh poyasov na primere Belomorskoj provintsii Fennoskandinavskogo shchita [Geology and geodynamics of the Archean mobile belts exemplified on the Belomorian Province of the Fennoscandian Shield]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2008. 296 p.

Volodichev O. I., Korol' N. E., Kuzenko T. I., Siblev O. S. Metamorfizm rannedokembriiskikh kom-

pleksov vostochnoi chasti Fennoskandinavskogo shchita [Metamorphism of the Early Precambrian complexes of the eastern part of the Fennoscandian Shield]. *Geologiya Karelii ot arkheya do nashikh dnei* [Geology of Karelia from the Archaean to the present]. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2011. P. 49–55.

Volotovskaya N. A., Zhiron K. K. Khromsoderzhashchie mineraly svity Khizovara [Chrome-bearing minerals of the Hisovaara suite]. *Izvestiya Karelo-finskoj nauchno-issledovatel'skoi bazy AN SSSR* [Proceed. of the Karelo-Finnish Scientific and Research Station AS USSR]. Petrozavodsk: Karelo-Fin. baza AN SSSR, 1948. P. 41–53.

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. Vol. 126, no. 1/2. P. 25–37.

Berman R. G., 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. Vol. 126. P. 1–22.

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. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. of the KarRC of RAS]. 2016. № 2. doi: 10.17076/geo265

Kretz R. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*. 1983. Vol. 68. P. 277–279.

Received May 24, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Никифоров Александр Геннадьевич

младший научный сотрудник отдела минерального сырья
Институт геологии Карельского научного центра РАН
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: eoaster@yandex.ru
тел.: +79116608602

CONTRIBUTOR:

Nikiforov, Aleksander

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: eoaster@yandex.ru
tel.: +79116608602