



Редкоземельная минерализация в рудах Гурвунурского апатит-магнетитового месторождения (Озёрнинский рудный узел, Западное Забайкалье)

Извекова А. Д.¹, Дамдинов Б. Б.², Рампилов М. О.²

¹ ФГБУН Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия

² ФГБУН Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Аннотация. Гурвунурское апатит-магнетитовое месторождение расположено в пределах Озёрнинского рудного узла в Западном Забайкалье. Особенностью данного объекта является наличие редкоземельной минерализации в рудах. К основным минералам-концентраторам РЗЭ относятся монацит, алланит, апатит и эпидот. Один из главных концентраторов РЗЭ – апатит, где содержание суммы РЗЭ достигает 2,6 мас. %. Редкоземельные элементы представлены в основном лёгкими лантаноидами; преимущественно распространены La до 1,8 мас. % и Ce до 2,08 мас. %. Монацит образуется в процессе рафинирования апатита, в котором появляется тонкая вкрапленность и прожилки монацита. Эпидот установлен в гнездах и прожилках скарновых минералов. Минерал содержит в основном лёгкие лантаноиды (La до 5,11 мас. %, Ce до 2,47 мас. %) и образует постепенные переходы в алланит, который, в свою очередь, встречается также в виде самостоятельных выделений, либо в составе агрегатов эпидот-алланитового состава. В составе алланита также преобладают лёгкие лантаноиды с содержаниями La до 9,16 мас. %, Ce до 14,35 мас. %. Изучение минерального состава и распределения РЗЭ в рудах и минералах позволяет сделать вывод о том, что редкоземельная минерализация в рудах Гурвунурского апатит-магнетитового месторождения образовалась в результате скарнирования пород карбонатсодержащей вулканогенно-осадочной толщи, а источником редкоземельной минерализации явились гранодиориты витимканского интрузивного комплекса.

Ключевые слова: Гурвунурское месторождение, апатит, магнетит, РЗЭ, скарны.

Для цитирования: Извекова А. Д., Дамдинов Б. Б., Рампилов М. О. Редкоземельная минерализация в рудах Гурвунурского апатит-магнетитового месторождения (Озёрнинский рудный узел, Западное Забайкалье). Руды и металлы. 2024. № 2. С. 55–68. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10009.

Rare earth mineralization in ores of the Gurvunur apatite-magnetite deposit (Ozerny ore cluster, Western Transbaikalia)

Izvekova A. D.¹, Damdinov B. B.², Rampilov M. O.²

¹ A. P. Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS, Irkutsk, Russia

² N. L. Dobretsov Geological Institute. SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Annotation. The Gurvunur apatite-magnetite deposit is located within the Ozerny ore cluster in Western Transbaikalia. A peculiarity of this object is the presence of rare-earth mineralization in the ores. The main REE concentrator minerals include monazite, allanite, apatite, and epidote. One of the main concentrators of REE is apatite, where the content of REE sum reaches 2.6 wt. %. The REE are mainly represented by light lanthanides, with La up to 1.8 wt. % and Ce up to 2.08 wt. % predominating. Monazite-(Ce) is formed in the process of apatite refining, leading to the monazite fine-grained dissemination and veinlets occurring. Epidote is found in nests and vein-like formations of skarn aggregates. The mineral mainly contains light lanthanides (La up to 5.11 wt. %, Ce up to 2.47 wt. %) and forms gradual transitions to allanite that, in its turn, is also found in the form of isolated segregations or as a part of aggregates of epidote-allanite composition. Light lanthanides with Ce up to 14.35 wt. % and La up to 9.16 wt. % predominate in the allanite composition. The study of the mineral composition and distribution of REE in ores and minerals allows us to conclude that rare-earth mineralization in the ores of the Gurvunur apatite-magnetite deposit was formed as a result of skarning of the carbonate-bearing volcanogenic-sedimentary rocks, and the source of rare-earth mineralization was granodiorites of the Vitimkan intrusive suite.

Keywords: Gurvunur deposit, apatite, magnetite, REE, skarns.

For citation: Izvekova A. D., Damdinov B. B., Rampilov M. O. Rare-earth mineralization in ores of the Gurvunur apatite-magnetite deposit (Ozerny ore cluster, Western Transbaikalia). Ores and metals, 2024, № 2, pp. 55–68. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10009.



Введение. Редкоземельные элементы играют значительную роль в современной промышленности. Применение РЗЭ находят в электронике, космической технике, атомной технике, машиностроении, приборостроении, металлургии, химической и стекольной промышленности.

Постоянное увеличение потребления РЗЭ в мировой экономике требует значительного увеличения знаний как об условиях образования месторождений, так и об особенностях редкоземельной минералогии объектов различных генетических типов. Как известно, месторождения-концентраторы РЗЭ относятся к эндогенным, экзогенным и метаморфогенным [2]. Среди эндогенных известны месторождения, связанные с пегматитами (монацитовые пегматиты Минас-Жерайс, Бразилия), с гранитами, щелочными гранитоидами и сиенитами (например, магнетит-гематит-флюоритовые тела с редкоземельной минерализацией, Китай), с щелочно-ультраосновными комплексами (Ловозерское месторождение), месторождения, ассоциирующие с карбонатами (Маунтин-Пасс, США; Томтор, Белозиминское, Россия) и коры выветривания по ним.

Экзогенные месторождения РЗЭ представлены аллювиальными россыпями (США, Бразилия, Индонезия, Малайзия, Нигерия), прибрежно-морскими россыпями монацита и ксенотима в Австралии, Индии, Бразилии, осадочными фосфоритами, органогенно-фосфатными образованиями (галечниковые фосфориты Флориды), рабдофанит-черчитовыми песками и песчаниками (США, Великобритания, Германия).

Метаморфогенные месторождения РЗЭ связаны с мигматитами, парагнейсами и кристаллическими сланцами, где присутствуют участки с редкоземельной минерализацией, а также представлены метаморфизованными россыпями и монацитоносными конгломератами.

Часть апатит-магнетитовых месторождений относится к апатитсодержащему титано-магнетитовому типу, связанному с габброидами (например, Волковское на Урале) [5]. Кроме того, апатит-магнетитовые месторождения локализируются в пределах щелочно-ультраосновных интрузий. Железорудные тела в этом слу-

чае представлены преимущественно апатит-форстеритовыми породами с вкрапленностью, жилами и прожилками магнетита, включениями редкометальных минералов. К этому типу относятся месторождения на Балтийском щите (Ковдорское). Апатит-магнетитовые руды нельсонитового типа содержат повышенные количества силикатных минералов, являются дифференциатами карбонатитового расплава, отделившимися от кристаллизующейся щелочной магмы [8]. Апатит-магнетитовые руды либо прорывают вмещающие их карбонатиты, либо образуют с карбонатитами постепенные переходы. К этому типу относится Дубравинское месторождение (КМА). Также известны месторождения типа IOA (Iron Oxide Apatite, или тип Кируна), генезис которых остаётся дискуссионным. Обсуждаются несколько вариантов образования таких месторождений: магматический (ликвационный), эксгальтационно-седиментационный и эпигенетический гидротермальный. Однако в последние годы наибольшее распространение получила концепция, согласно которой месторождения типа Кируна являются конечным членом обширной группы Fe-oxide-Cu-Au месторождений, обозначаемых как IOCG [9, 11].

Рассматриваемое в данной работе Гурвунурское апатит-магнетитовое месторождение находится в пределах Озёрнинского полиметаллического рудного узла (Западное Забайкалье), в пределах которого распространены колчеданно-полиметаллические, золото-полиметаллические, железорудные, железо-марганцевые, медно-баритовые месторождения [1, 3].

На территории Озёрнинского рудного узла известны два апатит-магнетитовых месторождения – Гурвунурское и Северо-Гурвунурское, характеризующиеся наличием редкоземельной минерализации. Месторождения расположены в западной части рудного узла и находятся на расстоянии 3 км друг от друга (рис. 1). В ходе поисково-разведочных работ высказывались разные точки зрения о природе образования как Гурвунурского, так и Северо-Гурвунурского месторождений: осадочная, вулканогенно-осадочная, скарновая, магматогенная (В. А. Бречалов и др., 1978).

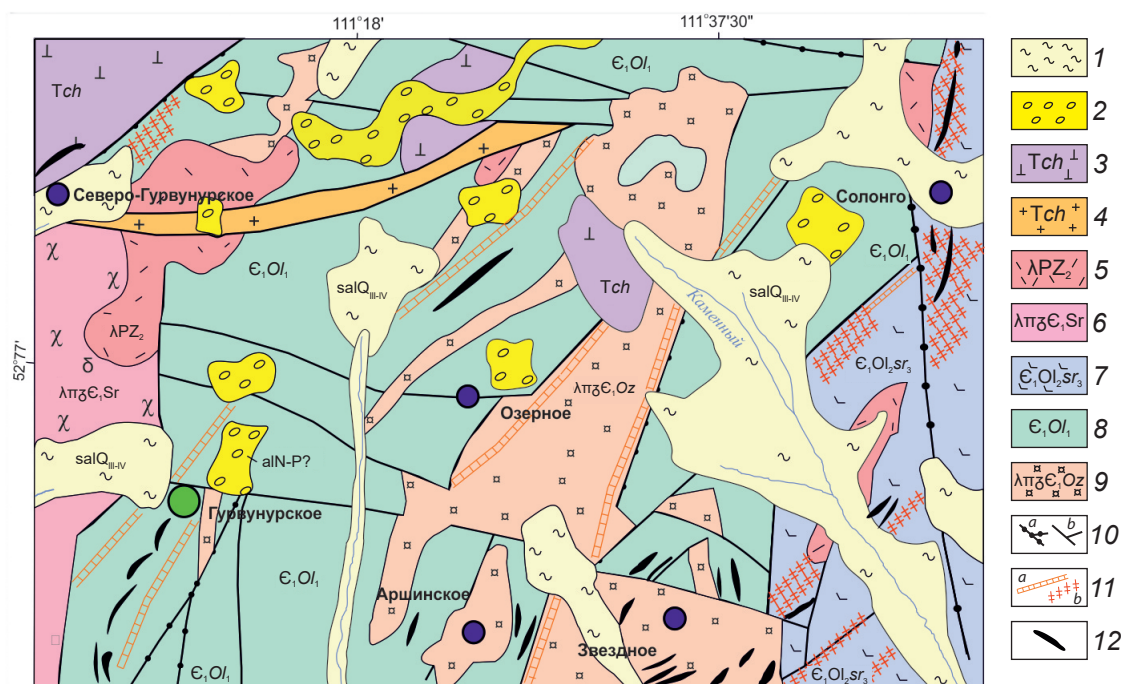


Рис. 1. Схематическая геологическая карта района Гурвунурского месторождения (по А. А. Миронов и др., 2008):

1 – солифлюкционно-аллювиальные отложения истоков рек (дресва, щебень, галечник, глыбы; заполнитель – глины, тяжёлые суглинки, суглинки бурого и коричневого цвета); 2 – аллювиальные отложения (галечник, гравий, валуны с глинистым и песчано-глинистым заполнителем серо-коричневого цвета); 3 – цаган-хунтейская свита: ортофиры, риолит-порфиры, андезитовые порфиры, туфы, туфолоавы, брекчии и эруптивные брекчии трахиориолитов, трахидацитов; 4 – субщелочные гранит-порфиры и их дайки; 5 – риолиты и их брекчии, андезитодациты, дациты и граниты, разномасштабные, массивные; 6 – сурхейтинский интрузивный комплекс (кварцевые и диоритовые порфиры); олдындинская свита: 7 – андезитовые и базальтовые порфиры, их туфы, линзы и прослои известняков, туфитов, плагиоориолитовых и плагиодацитовых порфиров, их туфов, 8 – автомагматические брекчии плагиориолитовых, плагиодацитовых порфиров и андезитодацитовых порфиров; 9 – озёрнинский субвулканический комплекс (переслаивание скарнированных известняков, известковых брекчий, туфитов, туфов плагиориолитовых и плагиодацитовых порфиров, подчинённо андезитовых порфиров); 10 – разрывные нарушения: *a* – оси основных рудоконтролирующих нарушений, *b* – установленные нарушения; 11 – изменённые породы: *a* – скарны, известковистые и магнезиальные, интенсивно сканеризованные породы, *b* – зоны кварцевой и сульфидно-кварцевой прожилковой и прожилково-вкрапленной минерализации; 12 – магнетитовые тела

Fig. 1. Schematic geological map of the Gurvunur deposit district (after Mironov A. A., 2008):

1 – solifluction-alluvial deposits of river sources: gruss, rubble, pebbles, blocks; filler: clays, heavy loams, brown and grayish brown loams; 2 – alluvial deposits: pebbles, gravel, boulders with clayey and sandy-clayey grayish brown filler; 3 – Tsagan-Khuntei formation: orthophyres, rhyolite-porphyrries, andesitic porphyrites, tuffs, tuff lavas, breccias, and eruptive breccias of trachyorhyolites, trachydacites; 4 – subalkaline granite porphyries and their dikes; 5 – rhyolites and their breccias, andesite-dacites, dacites, and granites, inequigranular, massive; 6 – Surkhehta intrusive suite: quartz and diorite porphyrites; Oldynda formation: 7 – andesitic and basaltic porphyrites, their tuffs, lenses and interlayers of limestones, tuffites, plagioryholite and plagiodacite porphyries and of their tuffs, 8 – automagmatic breccias of plagioryholite, plagiodacite porphyries and andesite-dacitic porphyrites; Ozerny subvolcanic complex: 9 – interlayering of skarnized limestones, calcareous breccias, tuffites, plagioryholitic tuffs, and plagiodacite porphyries, subordinate andesitic porphyrites; 10 – faults: *a* – axes of the main ore-controlling faults, *b* – established faults; 11 – altered rocks: *a* – calcareous and magnesian skarns, intensively skarnized rocks, *b* – zones of veinlet and veinlet-disseminated quartz and sulfide-quartz mineralization; 12 – magnetite bodies

Исследования соседнего с рассматриваемым Северо-Гурвунурского месторождения обнаружили присутствие признаков магматогенного образования руд, что позволило отнести его к типу Кируна [6]. Наиболее значимые признаки – присутствие в рудах апатита с повышенными содержаниями РЗЭ, резкие контакты рудных тел с вмещающими породами, наличие в рудах силикатных (амфибол, альбит, биотит) минералов и высокотемпературные условия минералообразования, рассчитанные по изотопной термометрии. Однако схожими признаками обладают и скарновые месторождения [7].

Таким образом, происхождение Гурвунурского и Северо-Гурвунурского месторождений остаётся недоизученным, и, соответственно, дискуссия относительно их генезиса ещё не закончена. Наиболее острыми являются вопросы об источнике и процессе формирования редкоземельной минерализации. В отношении генезиса руд Гурвунурского месторождения, рассматриваемого в данной статье, возможно несколько сценариев – магматический, вулканогенно-осадочный и скарновый. Следует отметить, что в пределах Озёрнинского рудного узла другие проявления редкоземельной минерализации неизвестны.

Ввиду вышесказанного целью данных исследований явилось изучение особенностей распределения РЗЭ в породах и минералах апатит-магнетитовых руд для выяснения происхождения РЗЭ минерализации и уточнения генезиса Гурвунурского месторождения.

Методы исследований. В работе, кроме результатов собственных исследований, основанных на изучении 160 м кернового материала, также были использованы материалы лаборатории петрологии ГИН СО РАН, отчёты геологоразведочных партий, составленные В. А. Бречаловым, Г. И. Скалиной (1978 г.), тематической партии под руководством Г. С. Румянцева (1965 г.).

Состав минералов, микроструктурные особенности, взаимоотношения и однородность минералов изучались на электронном микроскопе LEO-1430 с использованием энергодисперсионного спектрометра Inca Energy-300 (ана-

литик Е. В. Ходырева). Определения микроэлементного состава в апатите осуществлены методами ICP-AES (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ) и ICP-MS (ИГХ СО РАН, г. Иркутск). Определение содержаний РЗЭ в гранитоидах проводилось методом ICP-MS (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

Геологическое строение. Озёрнинский рудный узел расположен в Республике Бурятия в 350 км от г. Улан-Удэ и входит в состав Удино-Витимской островодужной системы, сформировавшейся в позднем рифее – палеозое в области активного взаимодействия Сибирского кратона и Палеоазиатского океана [3]. На площади узла известны колчеданно-полиметаллические, золото-полиметаллические, железорудные, железо-марганцевые, медно-баритовые месторождения, локализованные в скарнах и вулканогенно-осадочных образованиях.

Гурвунурское апатит-магнетитовое месторождение расположено в 2,5 км от Озёрного колчеданно-полиметаллического месторождения и приурочено к вулканогенно-карбонатным отложениям, относящимся к нижней подсвите олдындинской свиты нижнекембрийского возраста (рис. 2, 3). По данным разведочных работ Удино-Витимской экспедиции (1978–1986 гг.), разрез стратифицированных вулканогенно-карбонатных отложений района месторождения представляется в следующем виде (снизу-вверх): риолитовый горизонт с маломощными линзами известняков; туфовый горизонт с линзами доломитизированных известняков, состоящий из туфов, туфобрекций риолитов и риолит-порфиров, а также доломитизированных известняков; эффузивно-сланцевый горизонт с прослоями кварцевых порфиров. Интрузивные образования на месторождении представлены преимущественно диоритами и сиенит-порфирами, отнесёнными к витимканскому раннепалеозойскому и гуджирскому триасово-нижнеюрскому интрузивным комплексам, соответственно.

Скарнирование в рудном поле месторождения развито в участках, приуроченных к выходам интрузий гранодиоритов витимканского комплекса, но степень преобразования исходных вулканогенно-осадочных и интрузивных пород незначительна.

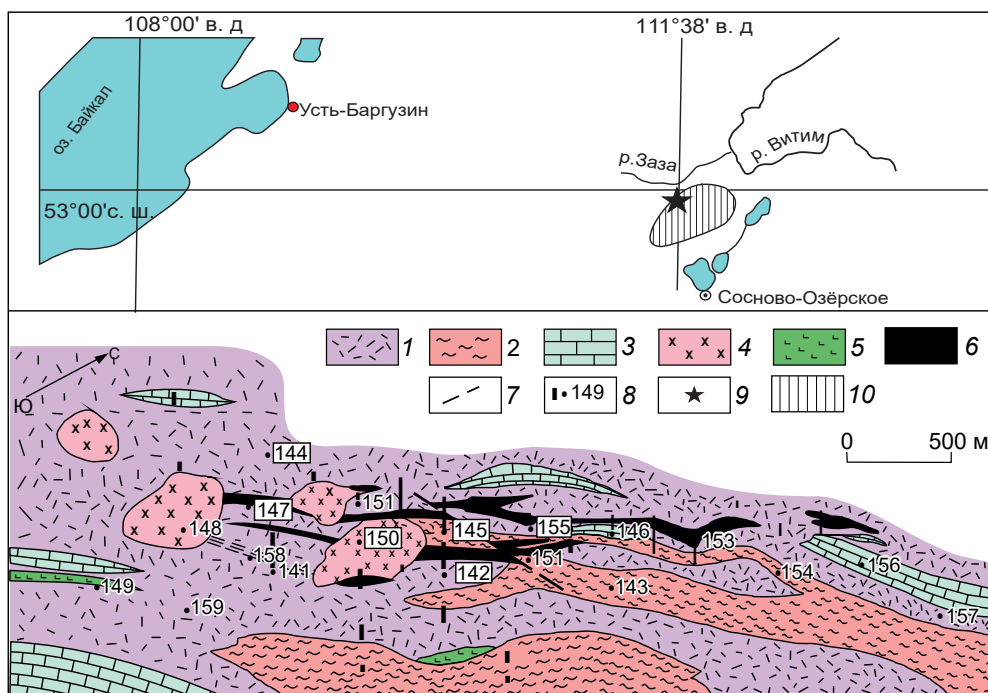


Рис. 2. Схематическая геологическая карта месторождения Гурвунурское (по материалам В. А. Бречалова, 1978):
1 – риолиты, риолит-порфиры, кварцевые порфиры; 2 – рассланцованные риолиты; 3 – мраморизованные известняки; 4 – диориты, гранодиориты; 5 – сиенит-порфиры; 6 – магнетитовые руды; 7 – тектонические нарушения; 8 – каналы, скважины и их номера; 9 – положение Гурвунурского месторождения; 10 – контур Озёрнинского рудного узла

Fig. 2. Geological sketch map of the Gurvunur deposit (compiled after Brechalov V. A., 1978):

1 – rhyolites, rhyolite-porphyrries, quartz porphyries; 2 – schistose rhyolites; 3 – marbleized limestones; 4 – diorites, granodiorites; 5 – syenite porphyries; 6 – magnetite ores; 7 – tectonic dislocations; 8 – ditches, boreholes and their numbers; 9 – Gurvunur deposit setting; 10 – Ozerny ore cluster outlines

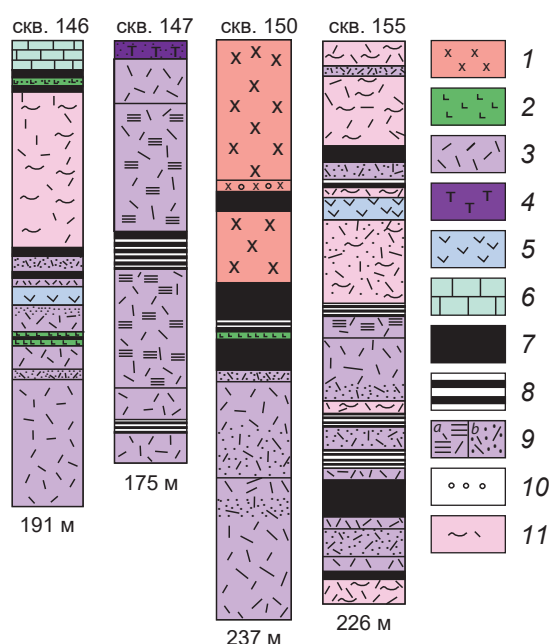


Рис. 3. Разрез скважин Гурвунурского месторождения (по материалам В. А. Бречалова, 1978):

1 – диориты, кварцевые диориты; 2 – сиенит-порфиры; 3 – риолиты, риолит-порфиры; 4 – туфы риолитов; 5 – андезитовые порфиры; 6 – мраморы; 7 – магнетитовые руды; 8 – апатит-магнетитовые руды; 9 – прожилки и вкрапленность магнетита: а – с апатитом, б – без апатита; 10 – скарны; 11 – рассланцованные риолиты

Fig. 3. Borehole section of the Gurvunur deposit (compiled after Brechalov V. A., 1978):

1 – diorites, quartz diorites; 2 – syenite-porphyrries; 3 – rhyolites, rhyolite-porphyrries; 4 – rhyolite tuffs; 5 – andesite porphyries; 6 – marbles; 7 – magnetite ores; 8 – apatite-magnetite ores; 9 – magnetite veinlets and dissemination: with apatite (a) and without apatite (b); 10 – skarns; 11 – schistosed rhyolites

живных пород низкая. Тела кальцит-эпидот-гранат-пироксеновых скарнов, которые в основном встречаются в виде небольших участков мелкозернистых пород тёмно-зелёного цвета, образуют субсогласные прослои мощностью до 1 м в риолитах, риолит-порфирах, реже пятнисто-прожилковые выделения в диоритах и телах магнетитовых руд.

Породы, вмещающие апатит-магнетитовые рудные тела, испытали метаморфизм на уровне серицит-хлоритовой субфации. По данным Ar/Ar изотопного датирования, метаморфические преобразования происходили в нижнепермский период ($293,3 \pm 2,5$ млн лет) [6].

Руды Гурвунурского месторождения представлены линзовидными телами сплошных и вкрапленных кварц-магнетитовых и пироксен-apatит-магнетитовых руд, связанных между собой постепенными переходами. Руды залегают среди риолит-порфиров, на контакте диоритов и риолит-порфиров, реже – среди доломитизированных известняков.

В кварц-магнетитовых рудах в заметных количествах присутствуют магнетит, гематит,

кварц, реже пирит, кальцит, апатит. Пироксен-apatит-магнетитовые руды сложены магнетитом, апатитом, гематитом, пироксеном (диопсид, реже геденберgit), в меньших количествах присутствуют амфибол (актинолит), гранат (андрадит), кальцит, флогопит, эпидот, а также алланит, рутил и сульфидные минералы (пирит, пирротин, халькопирит). Пироксен-apatит-магнетитовые руды характеризуются наличием сульфатных минералов (барит, целестин, баритоцелестин).

Минерализация РЗЭ. Минералы, содержащие РЗЭ, широко распространены в апатит-магнетитовых рудах Гурвунурского месторождения. Одним из главных концентраторов РЗЭ является апатит, в котором содержание суммы РЗЭ достигает 2,6 мас. %. Кроме апатита, РЗЭ содержат алланит, монацит, эпидот.

Апатит – один из самых распространённых (3–18 об. %) минералов пироксен-apatит-магнетитовых руд, небольшие количества его установлены и в кварц-магнетитовых рудах. В рудах, развитых в эндоконтактах гранодиоритовой интрузии, отмечаются повышенные



Рис. 4. Морфология выделения минералов апатит-магнетитовых руд:

a – кристаллы апатита в пироксен-apatит-магнетитовой руде (шлиф, николи х); *b* – выделения апатита в пироксен-apatит-магнетитовой руде; *c* – типичная минеральная ассоциация апатита, магнетита и кварца; *d* – эмульсионная вкрапленность монацита в апатите, алланит и агрегат амфибол-пироксенового состава (снимки *c, d* – в обратно отражённых электронах); Ap – апатит, Prx – пироксен, Mnt – магнетит, Qtz – кварц, Mnz – монацит, Aln – алланит, Di-Act – амфибол-пироксеновый агрегат

Fig. 4. Morphology of minerals in the apatite-magnetite ores

a – apatite crystals in pyroxene-apatite-magnetite ore (crossed polars); *b* – apatite in pyroxene-apatite-magnetite ore; *c* – typical mineral association of apatite, magnetite and quartz; *d* – emulsion dissemination of monazite in apatite, allanite and amphibole-pyroxene aggregate. The images *c* and *d* were taken in back-scattered electrons. Ap – apatite, Prx – pyroxene, Mnt – magnetite, Qtz – quartz, Mnz – monazite, Aln – allanite, Di-Act – amphibole-pyroxene aggregate



концентрации апатита. Он образует вкрапленность, гнёзда и пятнистые обособления среди магнетита и кварца (рис. 4, *a–c*). Представляет собой трещиноватые зёрна столбчатой и призматической формы размером 1–5 мм, иногда достигающие 1,5 см в длину (см. рис. 4, *a, b*). Часто ассоциирует с пироксеном и магнетитом, но по взаимоотношениям видно, что апатит образовался раньше пироксена и несколько позже магнетита (см. рис. 4, *a*). По составу он соответствует фтор-апатиту (ср. 3,3 мас. % F) (табл. 1), содержит примесь FeO (до 0,94 мас. %). Одна из особенностей состава апатита – наличие в нём хлора с содержанием до 0,45 мас. %.

В апатите в повышенных количествах присутствуют редкоземельные элементы (Σ REE до 2,6 мас. %), наличие которых обусловлено

эмульсионной вкрапленностью монацита. Содержание РЗЭ, по данным анализов ICP-MS, приведено в табл. 2. Они представлены в основном лёгкими лантаноидами с отношениями Ce/La – 1,97, Ce/Nd – 2,99, La/Nd – 1,52. Преимущественно распространены Ce (содержание от 0,11 до 2,8 мас. %) и La (от 0,8 до 1,73 мас. %).

В апатите широко проявлена вкрапленность монацита, образующая эмульсионную структуру распада (см. рис. 4, *d*), что, по мнению Г. С. Риппа [6], может быть объяснено отделением ряда редкоземельных элементов от апатита на этапе метаморфических преобразований, причём такой эффект многократно отмечался и на прочих апатит-магнетитовых месторождениях.

Табл. 1. Химические составы апатита из рудных тел месторождения, мас. %

Table 1. Chemical composition (wt. %) of apatite from the Gurvunur deposit

№ п/п	№ пробы	CaO	P ₂ O ₅	Cl	F	Ce ₂ O ₃	La ₂ O ₃	O=F ₂	Σ
1	147-20	52,29	41,7	0,36	2,49	1,46	0,8	1,05	99,09
2		51,91	40,88	0,44	3,39	0,86		1,43	97,48
3		52,33	40,72	0,45	3,84			1,62	97,34
4		52,26	41,53	0,31	2,22	2,8	0,9	0,94	99,97
5		54,77	42,53	0,31	3,11	0,11		1,31	100,57
6		54,84	42,03	0,37	3,57	0,12		1,51	100,68
7	147-28	56,82	41,98	0,3	3,36			1,42	101,99
8		56,63	43,9	0,21	4,5			1,9	103,35
9		56,39	43,31	0,25	3,91			1,65	102,22
10	147-19	53,41	41,96	0,33	2,82	1,75	0,89	1,19	101,16
11		52,85	41,36	0,37	3,73	1,32		1,57	99,63
12		52,16	41,13	0,3	3,45	1,15		1,46	98,19
13		51,81	41,15	0,32	2,38	1,51	0,73	1	97,9
14		52,3	42	0,31	3,43	1,52	0,9	1,45	101,46
15		52,69	41,15	0,25	2,36	1,97	1,1	1	99,52
16	147-17	53,83	42,78	0,19	3,42		1,44	1,44	101,66
17		52,8	41,45	0,35	3,34	1,77	1,41	1,41	101,12
18	147-18	53,45	42,5	0,32	3,5	0,21	1,9	1,48	101,88
19		55,37	42,42	0,29	3,56	0,24	1,5	1,5	103,38
20		54,68	42,33	0,34	3,2	0,15	1,77	1,35	102,47
21		52,08	42,67	0,26	4,01	0,16	1,73	1,69	100,91

Примечание. Проба 5 содержит 0,94 мас. % FeO, обусловленного примесью магнетита, проба 7 содержит 0,65 мас. % SrO, проба 9 содержит 0,1 мас. % MnO; здесь и далее пустая графа – элемент не обнаружен.

Табл. 2. Содержание элементов-примесей в апатитах и диорите (ppm)

Table 2. Content of trace elements in apatites and diorite (ppm)

Проба	Грано-диорит	Апатит			
	140-1	Гур2	Гур1	147-10	
Ti	2761,64	26,1			
Mn	608,35	885	861		927
Rb	47,96	0,5			4,6
Sr	771,45	371,3	391,8		377
Y	15,74	1131,9	1170		
Ba	1042,02	73,28			8,8
La	43,76	6367,4	4740		4490
Ce	80,39	12 650,8	9460		8581
Pr	8,5	1223,8	1000		892
Nd	27,73	4236	3150		2865
Sm	4,52	544,5	450		356
Eu	1,02	41,1	40		28
Gd	3,66	578,7	450		347
Tb	0,51	55,2	43		43
Dy	2,93	277,1	205		199
Ho	0,57	47,3	43		35
Er	1,55	125	100		93
Tm	0,25	14	12,2		11,4
Yb	1,58	77,5	80		61
Lu	0,24	9,6	9,4		7,9
Σ TR	177,21	26 248	19 782,6		18 009,3
Ce/La	1,84	1,99	2		1,91
Eu*	24,47	3292,5	2649,9		2073,6
La/Yb	27,7	82,2	59,30		73,6
Eu/Eu*	0,04	0,01	0,02		0,01

Примечание. $Eu^* = (SmN + GdN)/2$, Eu/Eu^* – величина европиевой аномалии, ΣTR – сумма редких земель.

Графики распределения редкоземельных элементов в апатитах, нормированные к хондриту, имеют конфигурацию кривых, близкую к составам РЗЭ Северо-Гурвунурского месторождения (рис. 5). Кривые распределения указывают на преобладание концентраций лёгких лантаноидов относительно тяжёлых. Кривые РЗЭ в апатите имеют выраженную отри-

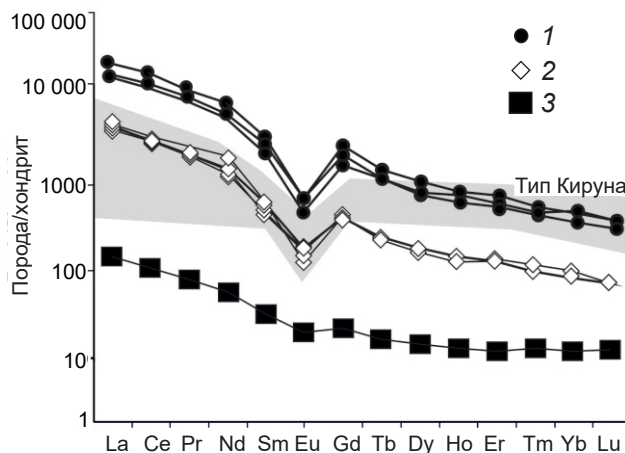


Рис. 5. Графики нормированных к хондриту (по [11]) содержаний РЗЭ в апатитах из руд Гурвунурского (1) и Северо-Гурвунурского (2) (по [6]) месторождений и гранодиорита (3) витимканского комплекса:

серое поле – распределение РЗЭ в апатитах из месторождений типа Кируна [10]

Fig. 5. Graphs of the chondrite-normalized [11] REE contents in apatite from ores of the Gurvunur (1) and North-Gurvunur (2) deposits [6] and granodiorite of the Vitimkan suite: grey area – REE distribution in the Kiruna-type deposits [10]

цательную европиевую аномалию ($Eu/Eu^* = 0,242$). Конфигурации спектров распределения РЗЭ в апатитах схожи со спектрами кислых интрузивных и эффузивных пород, изменённых в результате наложенных метасоматических процессов [4]. Значения Sr/Y и Sr/Mn отношений в апатите, согласно [10], ложатся в поле апатита, характерного для гранитоидов (рис. 6).

Монацит-(Ce) встречается в виде эмульсионной вкрапленности в апатите, в котором он часто слагает более крупные зёрна и прожилки по краям зёрен апатита. Присутствие CaO (до 0,9 мас. %) обусловлено захватом кальция из матрицы. В составе монацита преобладают лёгкие лантаноиды (Ce_2O_3 до 37,47, La_2O_5 до 22,34 мас. %) (табл. 3).

Эпидот установлен в гнездах и прожилках скарновых минералов, а также в диоритах и риолит-порфирах. Участками он присутствует в виде вкрапленности как в кварц-магнетитовых, так и в пироксен-apatит-магнетитовых рудах. Эпидот слагает неправильные, иногда призматические зёрна, присутствует в интер-

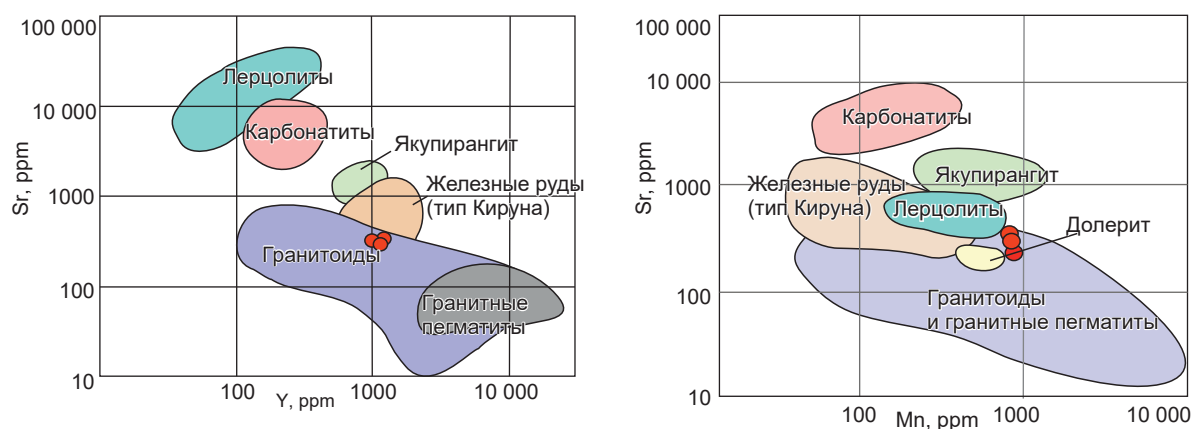


Рис. 6. Поля составов апатитов из различных типов пород, по [11]:
красными точками показаны отношения Y/Sr и Mn/Sr в апатитах Гурвунурского месторождения

Fig. 6. Fields of apatite composition from different rock types [11]:
red points on the plots show Y/Sr and Mn/Sr ratios in apatite of the Gurvunur deposit

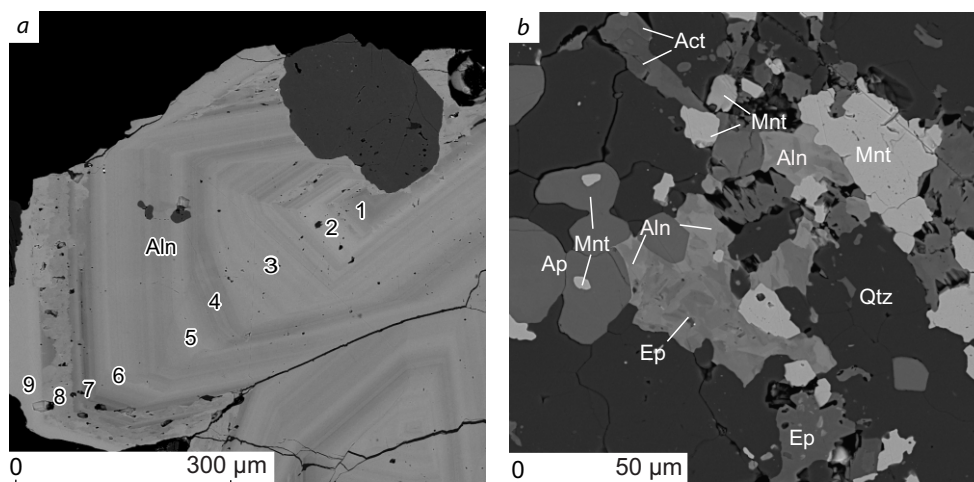


Рис. 7. Ассоциации алланита и эпидота в пироксен-апатит-магнетитовой руде на Гурвунурском месторождении:
a – зональность в кристалле алланита (Aln); *b* – выделения алланита и эпидота в кварц-магнетитовой руде (алланит образует ксеноморфные зёрна с пятнистой текстурой, обусловленной переходом в эпидот); снимок сделан в обратно отражённых электронах, Ep – эпидот, остальные усл. обозн. см. рис. 4

Fig. 7. Examples of allanite and epidote associations in pyroxene-apatite-magnetite ore at the Gurvunur deposit:
a – zoning in allanite (Aln) crystal; *b* – allanite and epidote in quartz-magnetite ore, allanite forms xenomorphic grains with a spotted texture due to the transition to epidote. The image in back-scattered electron; for other symbols see fig. 4

стициях между зёрнами магнетита, кварца и пироксена, в виде мелких прожилков, секущих кристаллы апатита. Химический состав минерала представлен в табл. 3. Он содержит в своём составе 0,61 мас. % MnO, присутствуют также лёгкие лантаноиды (La до 2,17 мас. %,

Ce до 1,14 мас. %). Вариации содержаний редкоземельных элементов обусловлены наличием участков, обогащённых этими элементами, вплоть до перехода в алланит-(Ce).

Алланит-(Ce) встречается в виде выделений неправильной, короткопризматической

Табл 3. Химические составы эпидота и монацита Гурвунурского месторождения, мас. %
Table 3. Chemical compositions (wt. %) of epidote and monazite from the Gurvunur deposit

Эпидот							
№ пробы	1	2	3	4	5	6	Mid
SiO ₂	35,36	36,03	38,62	35,41	35,4	36,6	36,24
Al ₂ O ₃	16,97	17,89	20,09	18,63	18,39	21,79	18,96
Fe ₂ O ₃	14,52	16,01	16,07	15,17	17,43	13,68	15,48
FeO	3,87	2,35		1,56			1,3
MnO	0,72	0,62	0,48			0,44	0,38
MgO			0,8				0,13
CaO	18,53	20,13	23,69	20,86	20,84	22,5	21,09
Ce ₂ O ₃	4,47	3,55		2,89	2,12		2,17
La ₂ O ₃	2,47	2,03		1,38	0,97		1,14
Pr ₂ O ₃	0,95	0					0,16
Nd ₂ O ₃	1,34	1,29					0,44
P ₂ O ₅							
Σ	99,2	99,9	99,73	95,9	95,15	95	97,48
Ce/La	1,81	1,75		2,09	2,19		1,31
Ce/Nd	3,34	2,75					
Монацит							
№ пробы	1	2	3	4	5	6	Mid
CaO	1,11	0,87		0,87	1,4	1,2	0,91
Ce ₂ O ₃	34,3	37,15	37,47	36,28	34,39	36,5	36,02
La ₂ O ₃	22,34	18,67	20,51	20,51	19,8	20,76	20,43
Pr ₂ O ₃		2,53	2,8	1,3	1,21	3,8	1,94
Nd ₂ O ₃	7,09	8,96	9,96	8,91	8,8	6,8	8,42
P ₂ O ₅	29,17	30,66	30,89	29,6	33,23	32,52	31,01
Σ	95,29	98,84	101,63	97,47	98,83	101,58	98,94
Ce/La	1,54	1,99	1,83	1,77	1,74	1,76	1,77
Ce/Nd	4,84	4,15	3,76	4,07	3,91	5,37	4,35

формы в апатит-магнетитовых рудах, где его количество достигает 1–1,5 %. По отношению к апатиту, магнетиту и пироксену минерал ксеноморфен. Некоторые зёрна имеют зональное строение (рис. 7, а) с переходом отдельных участков в эпидот от центра к периферии. Оно обусловлено изменением содержаний редкоземельных элементов. От центра к периферии повышается общее содержание La, но отмечается чередование участков, в разной степени обогащённых редкоземельными элементами.

Наиболее часто алланит встречается среди скоплений апатита, по отношению к которому является более поздним. Алланит корродирует зёрна апатита, развивается по трещинам и обрастает их по периферии (см. рис. 7, б). В составе минерала преобладают лёгкие лантаноиды с содержаниями Ce до 14,35 мас. %, La до 9,16 мас. %. В алланите установлены пониженные концентрации MgO и MnO, ThO₂ (табл. 4).

Обсуждение результатов. Особенностью апатит-магнетитовых руд Гурвунурского месторождения является наличие редкоземельной минерализации в рудах. Среди минералов, содержащих РЗЭ, выделены следующие: апатит, монацит-(Ce), эпидот и алланит-(Ce), в некоторых случаях эпидот постепенно переходит в алланит. Апатит содержит повышенное содержание редкоземельных элементов (La до 1,8, Ce до 2,8 мас. %). Значения Sr/Y отношений в апатите попадают в поле апатита, характерного для гранитоидов и гранитных пегматитов (см. рис. 6). Такие характеристики



Табл. 4. Химические составы алланита Гурвунурского месторождения, мас. %

Table 4. Chemical compositions (wt. %) of allanite from the Gurvynur deposit

№ пробы	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	32,18	31,68	33,4	34,08	31,24	29,07	29,78	31,26
Al ₂ O ₃	15,89	17,44	14,91	16,48	12,11	5,82	9,05	11,77
Fe ₂ O ₃	12,96	6,44	10,92	12,72	11,36	16,12	12,26	12,39
FeO	4,79	8	6,99	5,39	7,93	9,13	9,47	7,8
MnO		1,38	0,65	0,65	0,66	1,18	1,73	1,05
MgO						0,78		0,51
CaO	16,23	12,3	14,94	16,5	12,89	9,14	9,86	11,94
Ce ₂ O ₃	6,07	11,1	9,49	7,52	9,6	13,02	13,73	10,51
La ₂ O ₃	3,75	5,64	5,61	4,36	4,33	5,96	5,39	4,61
Pr ₂ O ₃					1,4		1,6	
Nd ₂ O ₃	1,59	2,61	2,27	1,75	3,38	3,79	3,95	3,86
Σ	93,46	96,6	99,17	99,45	94,9	94,01	96,83	95,69
Ce/La –	1,62	1,97	1,69	1,72	2,22	2,18	2,55	2,28
Ce/Nd –	3,82	4,25	4,18	4,3	2,84	3,44	3,48	2,72
№ пробы	9	10	11	12	13	14	15	Mid
SiO ₂	29,63	29,18	31,83	30,21	30,08	30,48	30,02	36,05
Al ₂ O ₃	9,71	9,03	11,58	9,49	8,24	10,05	9,46	18,89
Fe ₂ O ₃	13,46	15,22	12,14	13,2	14,25	18,48	19,27	15,41
FeO	8,06	7,4	8,67	9,57	8,64			1,11
MnO	1,21	1,37	1,29	0,68		1,21	0,62	0,32
MgO	0,5	0,75			1,61	1,46	1,58	0,11
CaO	10,4	10,2	12,1	10,87	9,74	9,5	9,09	20,62
Ce ₂ O ₃	13,59	11,83	12,09	11,63	14,35	12,54	13,63	2,59
La ₂ O ₃	5,82	5,48	5,83	5,81	9,16	6,74	7,85	1,15
Pr ₂ O ₃	1,6		1,23	1,67	0	1,27	1,15	0,14
Nd ₂ O ₃	3,56	3,62	3,42	3,55	2,81	3,95	2,82	0,51
Σ	97,54	94,07	100,18	96,67	98,87	95,68	95,49	97,13
Ce/La	2,34	2,16	2,07	2	1,57	1,86	1,74	2,25
Ce/Nd	3,82	3,27	3,54	3,28	5,11	3,17	4,83	5,08

Примечание. Проба 4 содержит 1,29 % ThO₂, проба 9 – 0,7 мас. % F. Значения по зонам роста минерала (центр 5, край 14) см. рис. 7.

апатита свидетельствуют о его генетической связи с гранодиоритами, что косвенно подтверждает скарновую природу апатитового оруденения.

Одним из минералов, содержащих РЗЭ, является эпидот. Наличие повышенных концентраций РЗЭ и постепенные переходы в ал-

ланит свидетельствуют об относительной обогащённости скарнирующих растворов лёгкими лантаноидами (La до 2,17, Ce до 1,14 мас. %). Алланит характеризуется неоднородным составом и зональностью, которая выражается в повышении содержания La от центра к периферии зёрен. Существенная зависимость со-

держаний РЗЭ и СаО в алланите и эпидоте подтверждает вариант изоморфного замещения по принципу $3\text{Ca}^{2+} \leftrightarrow 2\text{REE}^{3+}$.

Присутствие в рудах эпидота в ассоциации с клинопироксеном и гранатом – признак скарновой природы пироксен-апатит-магнетитового оруденения, скарнирование также развито в пределах участков, тяготеющих к интрузиям гранодиоритов. В то же время кварц-магнетитовые руды не содержат минералов скарновой ассоциации и характеризуются меньшим содержанием апатита, но по распределению РЗЭ в апатитах отличий между этими двумя типами руд не установлено. Есть вероятность, что апатит-магнетитовое оруденение возникло в результате скарновой переработки уже существующей более ранней генерации магнетита и вмещающих пород. Уточнение генезиса собственно магнетитовых руд требует дальнейших исследований.

В целом месторождение Гурвунурское отличается от соседнего и схожего по минеральному составу Северо-Гурвунурского большим количеством редкоземельных элементов в апатите и монаците, присутствием алланита и редкоземельного эпидота, но отсутствием ксенотима. Концентрации РЗЭ в апатитах Северо-Гурвунурского месторождения (до 1 мас. %) ниже, чем на Гурвунурском (до 2,6 мас. %). Это фиксируется на графике распределения РЗЭ, где спектры имеют схожую конфигурацию, но разный уровень содержания РЗЭ. Повышенное содержание апатита, монацита, и, соответственно, РЗЭ в этих минералах может быть связано с пространственной близостью

интрузий гранодиоритов. Удалённость Северо-Гурвунурского месторождения также может обуславливать полное отсутствие скарновых процессов и связанных с ними минеральных видов (в том числе редкоземельного эпидота).

Наличие агрегатов скарновых минералов, схожие спектры распределения РЗЭ в апатитах и гранодиоритах свидетельствуют в пользу скарновой природы пироксен-апатит-магнетитового оруденения Гурвунурского месторождения. Источником редкоземельной минерализации, так же как и скарнирующих растворов, вероятно, явились гранодиориты витимканского интрузивного комплекса.

Выводы. Характерной особенностью апатит-магнетитовых руд Гурвунурского месторождения являются минералы РЗЭ, которые формируют тесный парагенезис. Главные минералы-концентраторы РЗЭ – апатит, монацит, алланит и эпидот.

Полученные данные могут свидетельствовать о том, что источником РЗЭ явились гранодиориты витимканского комплекса, а руды образовались в процессе скарнирования карбонатно-вулканогенно-осадочных пород и первичных магнетитовых руд.

Экспедиционные и петрографические исследования проведены в рамках выполнения государственного задания ГИН СО РАН (проект № АААА-А21-121011390003-9) и ИГХ СО РАН (проект IX.130.3.1, №0284-2021-0001), химико-аналитические исследования, электронная микроскопия и интерпретация результатов выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-17-00106.

Список литературы

1. Викентьев И. В., Дамдинов Б. Б., Минина О. Р., Спирина А. В., Дамдинова Л. Б. Классификация процессов полиметаллического рудообразования и переходный VMS–SEDEX–MV-тип – пример гигантского Озёрного месторождения в Забайкалье, Россия // Геология рудных месторождений. – 2023. – Т. 65, № 3. – С. 201–236.
2. Гинзбург А. И., Журавлева Л. Н., Иванов И. Б., Щербина В. В. Геология месторождений редких элементов. Вып. 3. Редкоземельные элементы и их месторождения. – М. : Госгеотехиздат, 1959. – 126 с.
3. Гордиенко И. В., Нефедьев М. А. Курбино-Еравнинский рудный район Западного Забайкалья: геолого-геофизическое строение, типы рудных месторождений, прогнозная оценка и перспективы освоения // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57, № 2. – С. 114–124.



4. Перетяжко И. С., Савина Е. А. Тетрад-эффекты в спектрах распределения редкоземельных элементов гранитоидных пород как индикатор процессов фторидно-силикатной жидкостной несмешиваемости в магматических системах // Петрология. – 2010. – Т. 18, № 5. – С. 536–566.
5. Полтавец Ю. А., Полтавец З. И., Нечкин Г. С. Волковское месторождение титаномagnetитовых и медно-титаномagnetитовых руд с сопутствующей благороднометалльной минерализацией (Средний Урал, Россия) // Геология рудных месторождений. – 2011. – Т. 53, № 2. – С. 143–157.
6. Рунн Г. С., Ходырева Е. В., Избродин И. А., Рампилов М. О., Ласточкин Е. И., Посохов В. Ф. Генетическая природа апатит-магнетитовых руд Северо-Гурьинурского месторождения (Западное Забайкалье) // Геология рудных месторождений. – 2017. – № 5. – С. 419–433.
7. Синяков В. И. Генетические типы скарновых рудообразующих систем. – Новосибирск : Наука, СО, 1990. – 71 с.
8. Чернышов Н. М., Бочаров В. Л. Апатитовые руды в докембрийских карбонатитах Курской магнитной аномалии // Литосфера. – 2012. – № 6. – С. 112–118.
9. Aftabi A., Mohseni S., Babeki A., Azaraien H. Fluid inclusion and stable isotope of the Esfordi Apatite-Magnetite deposit, Central Iran – a discussion // Economic geology. – 2009. – 104 (1). – P. 137–139.
10. Belousova E. A., Griffina W. L., S. Y. O'Reilly, Fisher N. I. Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type // Journal of Geochemical Exploration. – 2002. – 76 (1). – P. 45–69.
11. Jami M., Dunlop A. C., Cohen D. R. Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran // Economic geology. – 2007. – 102 (6). – P. 1111–1128.
12. Mc Donough W. F., Sun S.-s. The composition of the Earth // Chemical Geology. – 1995. – 120 (3–4). – P. 223–253.

References

1. Vikent'ev I. V., Damdinov B. B., Minina O. R., Spirina A. V., Damdinova L. B. Klassifikatsiya protsessov polimetallicheskogo rudoobrazovaniya i perekhodnyi VMS–SEDEX–MV-tip – primer gigant'skogo Ozerogo mestorozhdeniya v Zabaikal'e, Rossiya [Classification of Polymetallic Ore-Forming Processes and Transitional VMS–SEDEX–MV-type: the Example of the Giant Ozerne Deposit in Transbaikalia, Russia], *Geologia rudnykh mestorozhdenij* [Geology of Ore Deposits], 2023, V. 65, No 3, pp. 201–236. (In Russ).
2. Ginzburg A. I., Zhuravleva L. N., Ivanov I. B., Shcherbina V. V. Geologiya mestorozhdenii redkikh elementov. Vyp. 3. Redkozemel'nye elementy i ikh mestorozhdeniya [Geology of deposits of rare elements. Vol. 3. Rare earth elements and their deposits], Moscow, Gosgeotekhnizdat Publ., 1959, 126 p.
3. Gordienko I. V., Nefed'ev M. A. Kurbino-Eravinskii rudnyi raion Zapadnogo Zabaikal'ya: geologo-geofizicheskoe stroenie, tipy rudnykh mestorozhdenii, prognoznaya otsenka i perspektivy osvoeniya [Kurbino-Eravinsky ore district of Western Transbaikalia: geological and geophysical structure, types of ore deposits, forecast assessment and development prospects], *Geologia rudnykh mestorozhdenij* [Geology of Ore Deposits], 2015, V. 57, No 2, pp. 114–124. (In Russ).
4. Peretyazhko I. S., Savina E. A. Tetradeffekty v spektrakh raspredeleniya redkozemel'nykh elementov granitoidnykh porod kak indikator protsessov fluoridno-silikatnoi zhidkostnoi nesmesimosti v magmaticheskikh sistemakh [Tetrad effects in the distribution spectra of rare earth elements of granitoid rocks as an indicator of the processes of fluoride-silicate liquid immiscibility in magmatic systems], *Petrologiya* [Petrology], 2010, V. 18, No 5, pp. 536–566. (In Russ).
5. Poltavets Yu. A., Poltavets Z. I., Nechkin G. S. Volkovskoe mestorozhdenie titanomagnetitovykh i medno-titanomagnetitovykh rud s soputstvuyushchei blagorodnometal'noi mineralizatsiei (Srednii Ural, Rossiya) [Volkovskoe deposit of titanomagnetite and copper-titanium magnetite ores with accompanying noble metal mineralization (Middle Urals, Russia)], *Geologia rudnykh mestorozhdenij* [Geology of Ore Deposits], 2011, V. 53, No 2. pp. 143–157. (In Russ).

6. Ripp G. S., Khodyreva E. V., Izbrodin I. A., Rampilov M. O., Lastochkin E. I., Posokhov V. F. Geneticheskaya priroda apatit-magnetitovykh rud Severo-Gurvunurskogo mestorozhdeniya (Zapadnoe Zabaikal'e) [Genetic nature of apatite-magnetite ores of the North Gurvunur deposit (Western Transbaikalia)], *Geologia rudnyh mestorozhdenij* [Geology of Ore Deposits], 2017, No 5, pp. 419–433.
7. Sinyakov V. I. Geneticheskie tipy skarnovykh rudoobrazuyushchikh system [Genetic types of skarn ore-forming systems], Novosibirsk, Nauka Siberian branch Publ., 1990, 71 p.
8. Chernyshov N. M., Bocharov V. L. Apatitovye rudy v dokembriiskikh karbonatitakh Kurskoi magnitnoi anomalii [Apatite ores in Precambrian carbonatite of Kursk Magnetic Anomaly], *Litosfera* [Lithosphere], 2012, No 6, pp. 112–118. (In Russ).
9. Aftabi A., Mohseni S., Babeki A., Azaraien H. Fluid inclusion and stable isotope of the Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran – a discussion, *Economic Geology*, 2009, No 104 (1), pp. 137–139.
10. Belousova E. A., Griffina W. L., S. Y. O'Reillya, Fisher N. I. Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type, *Journal of Geochemical Exploration*, 2002, No 76 (1), pp. 45–69.
11. Jami M., Dunlop A. C., Cohen D. R. Fluid inclusion and stable isotope study of the Esfordi apatite-magnetite deposit, Central Iran, *Economic Geology*, 2007, No 102 (6), pp. 1111–1128.
12. *Mc Donough W. F., Sun S.-s.* The composition of the Earth, *Chemical Geology*, 1995, No 120 (3-4), pp. 223–253.

Извекова Александра Дмитриевна (boxjer@mail.ru)

кандидат геол.-минерал. наук, научный сотрудник ¹

Дамдинов Булат Батуевич

доктор геол.-минерал. наук, заместитель директора по научной работе ²

Рампилов Михаил Олегович

кандидат геол.-минерал. наук, заведующий лабораторией металлогении и рудообразования ²

¹ ФГБУН Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия

² ФГБУН Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия