



<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-12-1-3>

УДК 553.2

Гранаты из скарнов Новониколаевского месторождения меди (Южный Урал)

В.В. Хребтневский¹, О.Ю. Плотинская²

¹Московский государственный университет, Ленинские горы 1, г. Москва, Россия, st064292@gmail.com

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Старомонетный пер. 35, г. Москва, Россия, plotin-olga@ya.ru

Статья поступила в редакцию 00.00.2025 г., после доработки 00.00.2026 г., принята к печати 00.00.2026 г

Аннотация. В статье рассмотрен состав гранатов из скарнов Новониколаевского месторождения меди (Южный Урал), который сопоставлен с составом гранатов из Гумёшевского и Тарутинского скарново-медно-порфировых месторождений на Урале. На Новониколаевском месторождении выделено три генерации граната серии андрадит-гроссуляр, что характерно для скарновых месторождений. Медианное содержание TiO_2 в гранатах первой и второй генерации составляет 0.37 мас. %, в гранатах третьей генерации – 2.38 мас. %. Такие содержания TiO_2 и умеренно железистый состав (And_{40-54}) части гранатов Новониколаевского месторождения, возможно, свидетельствуют об увеличении температуры формирования гранатов на проградной стадии от ранней генерации к поздней, а также об относительно более высокотемпературных условиях формирования гранатов месторождения по сравнению с таковыми из Тарутинского и Гумёшевского месторождений. Другой причиной присутствия умеренно железистых гранатов в экоскарнах может являться относительно слабый окислительный потенциал флюида, который, вероятно, также повлиял и на образование большего количества магнетита на Новониколаевском месторождении по сравнению с Тарутинским месторождением. Состав гранатов Новониколаевского и Гумёшевского месторождения характерен для Au-Fe-Cu скарновых объектов, а Тарутинского – Cu скарновых месторождений.

Ключевые слова: скарны, гранат, андрадит, гроссуляр, скарново-медно-порфировые месторождения, Южный Урал, Михеевское месторождение, Новониколаевское месторождение.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (г. Москва, Россия).

Благодарности. Авторы выражают благодарность руководству ОАО «Михеевский ГОК» (Челябинская обл., Россия) за предоставленные материалы для исследования, сотрудникам Лаборатории локальных методов исследования вещества Московского государственного университета (г. Москва, Россия) и сотрудникам Лаборатории кристаллохимии минералов Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (г. Москва, Россия) за электронно-микроскопический анализ. Авторы признательны рецензенту к.г.-м.н. Ю.Д. Гриценко за конструктивные замечания.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. Хребтневский В.В. – разработка концепции, исследование, визуализация, написание рукописи; Плотинская О.Ю. – разработка концепции, редактирование финального варианта рукописи.

Для цитирования: Хребтневский В.В., Плотинская О.Ю. Гранаты из скарнов Новониколаевского месторождения меди (Южный Урал). Минералогия, 12(1), 44–59. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-12-1-3>.

Skarn garnets of the Novonikolaevskoe copper deposit (South Urals)

V.V. Khrebtievsky¹, O.Yu. Plotinskaya²

¹Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, Russia, st064292@gmail.com

²Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Staromonetny per. 35, Moscow, Russia, plotin-olga@ya.ru

Received 00.00.2025, revised 00.00.2025 accepted 00.00.2026

Abstract. The paper describes the composition of skarn garnets of the Novonikolaevskoe Cu deposit (South Urals) in comparison with that of garnets of the Gumeshti and Tarutino skarn copper porphyry deposits in the Urals. Three generations of the andradite-grossular group garnets are distinguished at the Novonikolaevskoe deposit, which is typical of skarn deposits. The median TiO₂ content of garnet-1 and garnet-2 is 0.37 wt. % reaching 2.38 wt. % in garnet-3. This TiO₂ content of garnets and relatively low Fe contents in some garnets from exoskarns (And₄₀₋₅₄) possibly indicates a temperature increase during the skarn formation stage of garnets at the Novonikolaevskoe deposit, as well as relatively higher-temperature conditions of formation of garnet at the deposit compared to those from the Tarutino and Gumeshti deposits. Another reason for the low Fe contents in exoskarn garnets may be low fluid redox conditions during the formation of skarns at the Novonikolaevskoe deposit compared to the Tarutino deposit. According to the composition of garnet, the Novonikolaevskoe and Gumeshti deposits can be classified as Au-Fe-Cu skarn deposits, whereas the Tarutino deposit can be ascribed to a Cu-skarn deposit.

Keywords: skarns, garnet, andradite, grossular, skarn copper porphyry deposits, South Urals, Mikheevskoe deposit, Novonikolaevskoe deposit.

Funding. This work is supported by state contract of the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS (Moscow, Russia).

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the management of the «Mikheevsky GOK» (Chelyabinsk region, Russia) for providing the materials for studies, staff of the Laboratory of Local Analytical Methods of the Moscow State University (Moscow, Russia) and staff of the Laboratory of Crystal Mineral Chemistry of the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry RAS (Moscow, Russia) for electron microscopic analysis.

Conflict of interest. The authors declare that they have no conflicts of interest.

Author contribution. Khrebtievsky V.V. – concept development, research, visualization (data visualization/display); Plotinskaya O.Yu. – concept development, editing the final version of the manuscript.

For citation: Khrebtievsky V.V., Plotinskaya O.Yu. Skarn garnets of the Novonikolaevskoe copper deposit (South Urals). *Mineralogy*, 12(1), 44–59. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-12-1-3>.

ВВЕДЕНИЕ

Новониколаевское месторождение меди расположено на территории Варненского муниципального района Челябинской области на Южном Урале (рис. 1а). В 8 км на северо-северо-восток от него располагается Михеевское медно-порфировое месторождение – одно из крупнейших месторождений меди в России. При первом геологическом описании Новониколаевское месторождение было отнесено к медно-порфировому типу (Белгородский и др., 1991) по аналогии с Михеевским месторождением. С тех пор исследования на данной территории были сфокусированы на последнем (Гирфанов

и др., 1991; Шаргородский и др., 2005; Грабежев и др., 2011; Плотинская и др., 2015, 2022; Plotinskaya et al., 2018). Новониколаевское месторождение практически не изучалось, за исключением работы (Горбунов и др., 2019), где дана только краткая характеристика рудной минерализации. Скарны на Новониколаевском месторождении отмечались (Белгородский и др., 1991), однако информация об их составе и связи с оруденением отсутствует.

Цель настоящей работы – сравнение состава гранатов из скарнов Новониколаевского месторождения с составами гранатов скарново-медно-порфировых месторождений Южного Урала (Гумешевское и Тарутинское) и возможная геолого-про-

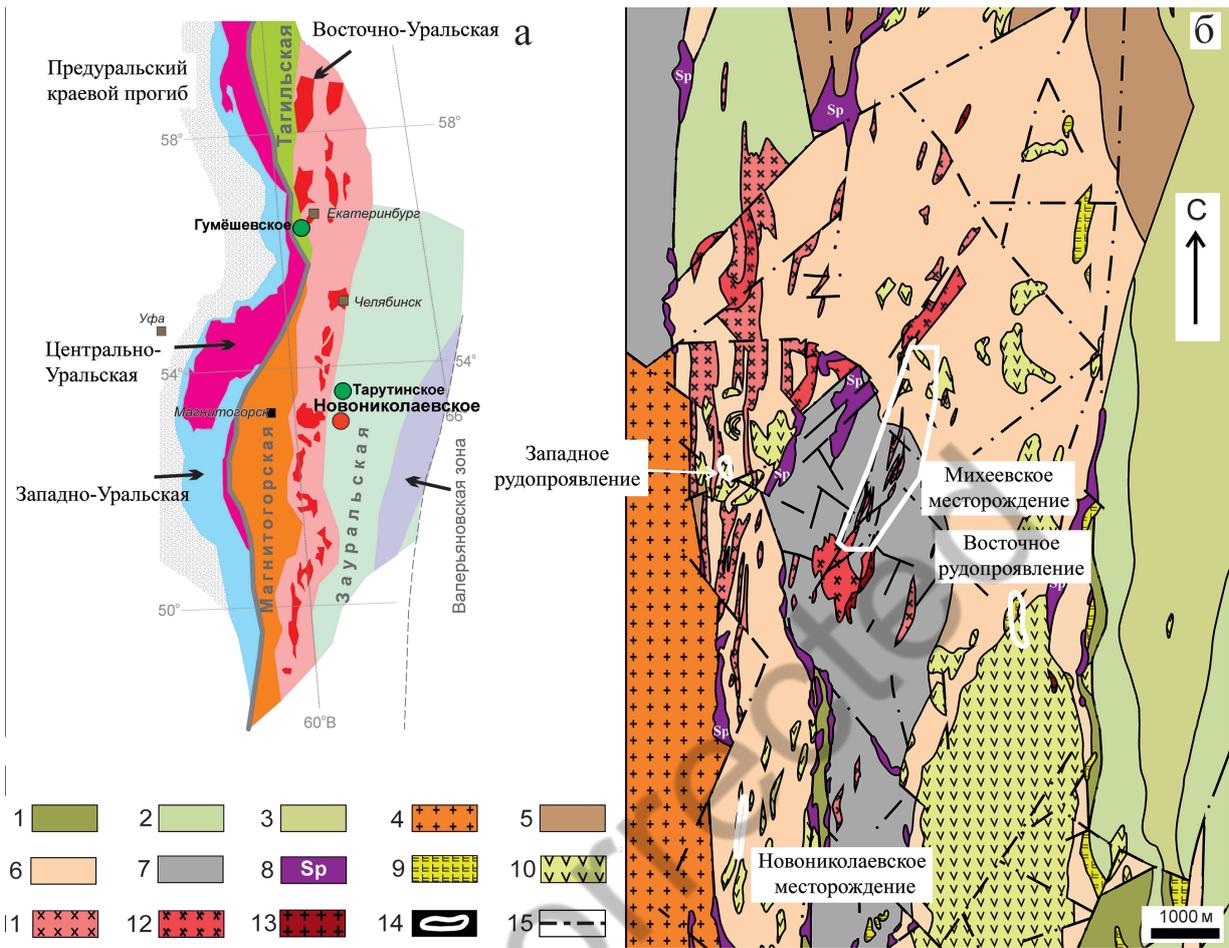


Рис. 1. Тектоническая схема Южного и Среднего Урала и положение месторождений, рассматриваемых в данной работе (Puchkov, 2017; Плотинская, 2023; Рыбалка и др., 2007) (а) и схематическая геологическая карта Михеевского рудного узла по данным ОАО «ЮУГРК» (Шаргородский и др. 2003, с изменениями) (б).

1 – амфиболиты (Pz1?); 2 – углисто-глинистые, кремнисто-углистые сланцы (S1); 3 – туфы основного состава, алевролиты, силициты (S1-S2); 4 – плагииграниты (C1?); 5 – тогузакская толща (D1): базальты; 6 – вулканогенно-осадочная толща (D3): известняки, алевропесчаники, туфопесчаники, песчаники аркозовые, алевролиты, грубо- и разнообломочная порода преимущественно основного состава, андезитобазальты и их туфы, базальты; 7 – афировые базальты и их лавокластиты и туфы, силициты, песчаники, углисто-кремнистые породы (D3); 8 – серпентиниты и хлорит-карбонатные породы по серпентинитам (D3); 9 – ульяновский субвулканический комплекс (D3-C1): дайки и дайкообразные тела диабазов и габбродиабазов; 10 – штоки и дайки андезитовых порфиритов, их брекчий, малые тела дацитов, риодацитов; 11 – михеевский интрузивный комплекс (D3-C1): дайки диоритовых порфиритов; 12 – штоки и дайки кварцевых диоритов и плагиигранитов; 13 – дайки плагиигранит-порфиритов, плагиигранодиорит-порфиритов; 14 – месторождения и рудопроявления медно-порфиритовых руд, 15 – разрывные нарушения.

Fig. 1. Tectonic scheme of South and Central Urals and position of the deposits considered in this work (Puchkov, 2017; Plotinskaya, 2023; Rybalka et al., 2007) (a) and schematic geological map of the Mikheevsky ore cluster, modified after (Shargorodsky et al. 2003) (b).

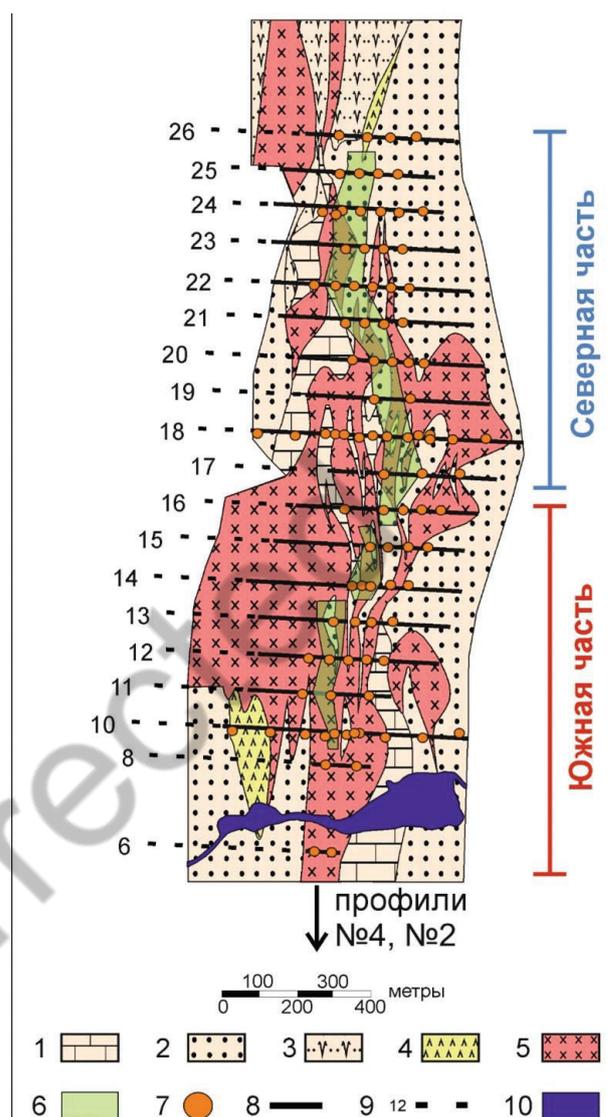
1 – amphibolite (Pz1?); 2 – carbonaceous-clayey and siliceous-carbonaceous shale (S1); 3 – mafic tuff, siltstone, silicite (S1-S2); 4 – Novonikolaevsky complex (S2?): plagiogranite, granite gneiss; 5 – Toguzak Sequence (D1): basalt; 6 – volcanosedimentary sequence (D3): limestone, silty sandstone, tuffaceous sandstone, arkose sandstone, siltstone, mostly mafic coarse- and mixed-clastic rocks, basaltic andesite and tuff, basalt; 7 – aphyric basalt and lava clastite and tuff, silicite, sandstone, carbonaceous-siliceous rocks (C1); 8 – serpentinites and chlorite-carbonate rocks after serpentinites (C1); 9 – Ulyanovsky subvolcanic complex (D3-C1): dikes of diabase and gabbrodiabase; 10 – stocks and dikes of andesite porphyrite, their breccias, small bodies of dacite and rhyodacite; 11 – Mikheevsky intrusive complex (D3-C1): dikes of diorite porphyrite; 12 – stocks and dikes of quartz diorite and plagiogranite; 13 – dikes of plagiogranite porphyry, plagiogranodiorite porphyry; 14 – deposits and ore occurrences of porphyry copper ores; 15 – faults.

Рис. 2. Схематическая геологическая карта Новониколаевского месторождения со снятым чехлом рыхлых отложений по данным АО РМК «Михеевский ГОК».

Вулканогенно-осадочная толща D3: 1 – известняки; 2 – алевролиты, песчаники; 3 – переслаивание туфов, алевролитов, песчаников; 4 – ульяновский субвулканический комплекс (D3-C1): риодациты, андезиты; 5 – михеевский интрузивный комплекс (D3-C1): диоритовые порфириды; 6 – контур тела первичных сульфидных руд Cu; 7 – разведочный профиль; 8 – номер разведочного профиля; 9 – русловая часть р. Караталы-Аят; 10–12 – места отбора гранатосодержащих скарнов: 10 – гранатовый; 11 – эпидот-гранатовый; 12 – пироксен-гранатовый.

Fig. 2. Schematic geological map of the Novonikolaevskoe deposit with removed Quaternary sediments after materials of jsc RMC «Mikheevsky GOK».

Volcanosedimentary sequence D3: 1 – limestone; 2 – siltstone, sandstone; 3 – interbedding of tuff, siltstone, sandstone; 4 – UlyanovskY subvolcanic complex (D3-C1): rhyodacite, andesite; 5 – Mikheevsky intrusive complex (D3-C1): diorite porphyrite; 6 – contour of primary Cu sulfide ore body; 7 – exploration profile; 8 – number of exploration profile; 9 – Karataly-Ayat River; 10 – sampling points of garnet-bearing skarns: 10 – garnet; 11 – epidote-garnet; 12 – pyroxene-garnet.



мышленная типизация рассматриваемых месторождений по составу граната (Meinert, 1992).

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Новониколаевское и Михеевское месторождения, а также ряд менее изученных рудопроявлений меди приурочены к Тарутинско-Новониколаевской рудной подзоне и Михеевскому рудному узлу (рис. 1б). В структурном плане Новониколаевское месторождение расположено в Зауральской мегазоне, локализовано в восточном экзоконтакте одноименного гранитоидного массива и относится к западному крылу Михеевской грабен-синклинали, которое осложнено субмеридиональным магмо- и рудоконтролирующим Тарутинско-Джетыгаринским разломом (Шаргородский и др., 2005).

В геологическом строении Новониколаевского месторождения принимают участие верхнедевонские вулканогенно-осадочные образования, представленные алевролитами, песчаниками, известняками и туфами (рис. 2). Они прорваны штоками и дайками Михеевского комплекса, который подразделяют на ульяновский андезит-дацит-риодацитовый и михеевский диорит-порфиритовый комплексы (Шаргородский и др., 2005; Тевелев и др., 2018). U-Pb (SHRIMP-II) возраст циркона из порфиридовидного кварцевого диорита Михеевского комплекса составляет 356 ± 6 Ма (Грабежев, Ронкин, 2011), что позволяет отнести эти комплексы к позднему девону – раннему карбону. В сильно подчиненном количестве также встречаются серпентиниты, образовавшиеся, предположительно, по ультраосновным породам Дружининского комплекса. Гидротермальные изменения выражаются в

скарнировании, пропилитизации, кварц-карбонат-серицитовых изменениях и аргиллизации (Белгородский и др., 1991; Шаргородский и др., 2005). Скарновые изменения проявлены, преимущественно, в южной части месторождения (профили 6-16), а в северной части проявлены слабо (профили 17-26) (рис. 2). Оруденение представлено субмеридиональным линейным штокверком, прослеживаемым по простиранию на 1.6 км и образованным крутопадающими кварц-карбонат-хлоритовыми прожилками, вкрапленностью, а также мелко-гнездовыми агрегатами пирита и халькопирита.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изучено 11 гранатсодержащих образцов, отобранных из керна пяти скважин, расположенных в южной части месторождения (рис. 2). Морфология гранатов, их структурно-текстурные особенности и взаимоотношения с другими минералами изучены в прозрачно-полированных шлифах с помощью поляризационного микроскопа Olympus BX-51. Химический состав гранатов исследован в Лаборатории локальных методов исследования вещества Геологического факультета Московского государственного университета (г. Москва, Россия) с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM IT-500 («Jeol», Japan) с энергодисперсионным детектором рентгеновского излучения X-Max^N (Oxford Instruments, GB), сверхтонким окном и площадью активной зоны кристалла 50 мм² и при ускоряющем напряжении 20 кВ и силе тока электронного зонда 0.7 нА (аналитики В.О. Япаскерт, Н.Н. Коротаева) и в Лаборатории кристаллохимии минералов Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (г. Москва, Россия) с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5610LV («Jeol», Japan) с энергодисперсионным детектором рентгеновского излучения ULTIM MAX 100 (Oxford Instruments, GB), площадью активной зоны кристалла 50 мм² и при ускоряющем напряжении 25 кВ и силе тока 0.7 нА (аналитики Л.А. Иванова, Л.А. Левицкая). Такие же условия измерения и продолжительность экспозиции (100 с) задавались и при измерении стандарта, в качестве которого использовался природный гранат USNM-143968. Систематическая погрешность измерения главных (более 10 мас. %) компонентов, оцененная по указанному выше стандарту, не превышала 1 отн. %. Для второстепенных компонентов (от 1 до 10 мас. %) величина относительной

погрешности находилась в пределах 5%. Пределы обнаружения для всех анализируемых элементов не превышают 0.03–0.05 мас. %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На Новониколаевском месторождении гранат является главным породообразующим минералом скарнов. Он встречается в экзо- и эндоскарнах. Экзоскарны макроскопически представляют собой буроватые тонко- и мелкокристаллические породы с массивной или пятнистой текстурой (рис. 3А). Эндоскарны – желтоватые породы с реликтовой порфировой структурой (порфиновые вкрапленники представлены плагиоклазом, обычно полностью замещенным серицитом, и амфиболом, чаще всего полностью замещенным хлоритом) и мелко-, тонкокристаллической основной массой (рис. 3Б). Микроскопически скарны характеризуются порфиробластовой структурой с выделяющимися на фоне основной массы зернами граната и лепидогранобластовой структурой основной массы, которая сложена кварцем, карбонатом и хлоритом (рис. 4). Содержание граната в шлифах сильно варьирует от содержания хлорита, карбоната и кварца, которые замещают его при апоскарновых изменениях. В наименее измененных скарнах содержание граната в шлифах достигает 60%. Помимо основных сульфидов (пирита и халькопирита) в скарнах часто встречается магнетит. Он образует густую вкрапленность в скарнах, иногда составляя до 50% площади шлифа. Также на месторождении часто встречаются породы, сложенные магнетитом до 70%, тесно ассоциирующие с гранат-содержащими скарнами, которые можно отнести к полнопроявленным ретроградным (апоскарновым) метасоматитам.

В шлифах гранат почти всегда встречается совместно с магнетитом, эпидотом, хлоритом, кварцем и карбонатом, которые всегда обрастают или пересекают его по трещинам (рис. 4, 5). Только в одном образце гранат ассоциирует с диопсидом, который образует мелкие ксеноморфные зерна до 10 мкм, почти полностью замещенные карбонатом (рис. 5Г).

Все изученные гранаты относятся к серии андрадит-гроссуляр и имеют состав And_{17-98} (табл. 1). Содержание пиропового минала в отдельных гранатах не превышает 4%, алмандинового – 5%, спессартинового – 2%, уваровитового – 1%, суммы шорломитового и моримотоитового – 11 %.



Рис. 3. Гранатовый экзоскарн с магнетитом, карбонатом и сульфидами (А) и гранатовый эндоскарн с хлоритом и карбонатом (Б), Новониколаевское месторождение.

Fig. 3. Garnet exoskarn with magnetite, carbonate and sulfides (A) and garnet endoskarn with chlorite and carbonate (B), Novonikolaevskoe deposit.

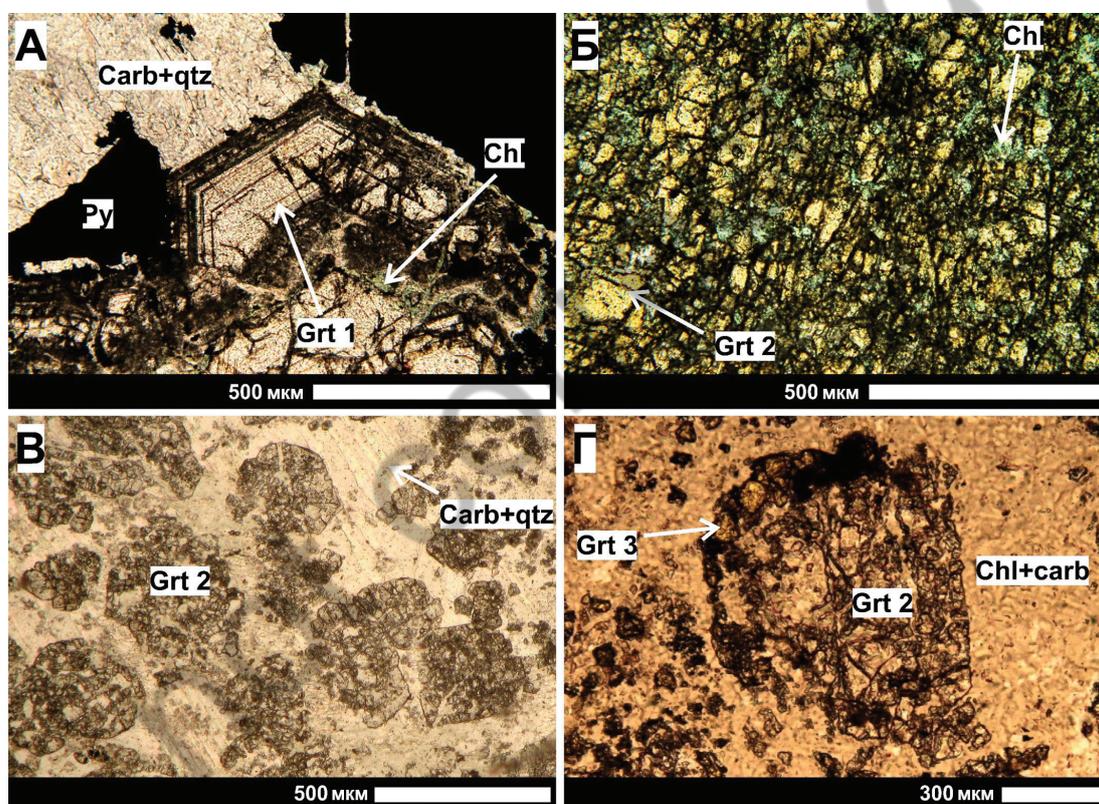


Рис. 4. Минеральные ассоциации с гранатом Новониколаевского месторождения: а – идиоморфный бесцветный гранат-1 (Grt-1) с осцилляторной зональностью, контактирующий с пиритом (Py) и просечками кварца (Qtz), карбоната (Carb) и хлорита (Chl) в экзоскарне; б – ксеноморфный оранжевый гранат-2 (Grt-2) в экзоскарне с хлоритом, развитым по трещинам в гранате; в – идиоморфный бесцветный гранат-2 в эндоскарне с интерстициальными карбонатом и кварцем; г – изометричный желтоватый гранат-3 (Grt-3) вокруг бесцветного ксеноморфного гранат-2 в эндоскарне с хлоритом и карбонатом в трещинах.

Проходящий свет (никели ||).

Fig. 4. Mineral assemblages with garnet of the Novonikolaevskoe deposit: а – euhedral colorless garnet-1 (Grt-1) with oscillatory zoning at the contact with pyrite (Py) crossed by quartz (Qtz), carbonate (Carb), and chlorite (Chl) veinlets in exoskarn; б – anhedral orange garnet-2 (Grt-2) in exoskarn with chlorite along fractures in garnet; в – euhedral colorless garnet-2 in endoskarn with interstitial carbonate and quartz; г – isometric yellowish garnet-3 (Grt-3) overgrowing anhedral colorless garnet-2 in endoskarn with chlorite and carbonate along fractures in garnet.

Transmitted light (nicols ||).

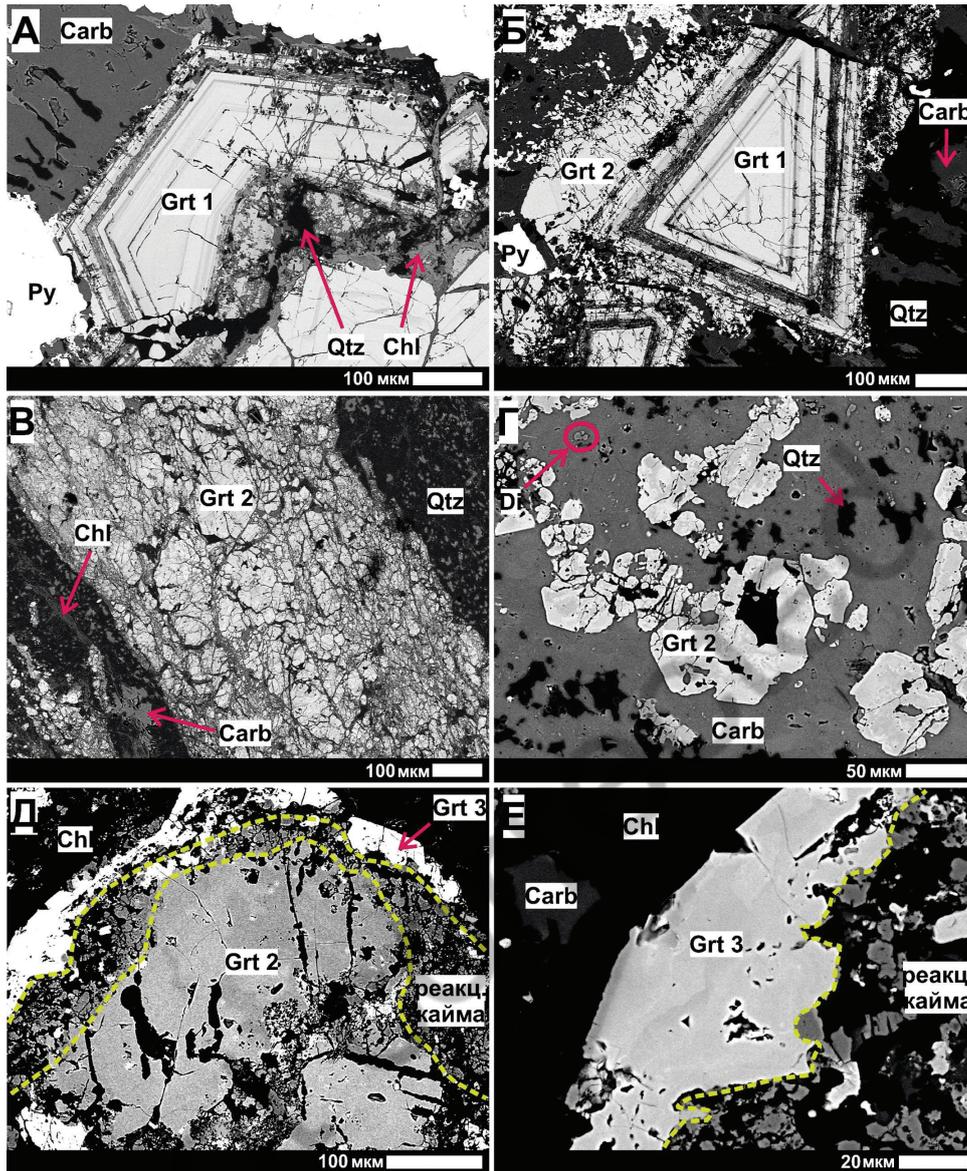


Рис. 5. Агрегаты граната и ассоциирующих минералов Новониколаевского месторождения: а – фрагмент кристалла граната-1 (Grt-1) с осцилляционной зональностью, рассеченное прожилком хлорита (Chl), кварца (Qtz) и карбоната (Carb) в экзоскарне; б – кристалл граната-1 с осцилляционной зональностью и каймой граната-2 (Grt-2) секториального строения в экзоскарне; в – прожилковидные скопления граната-2 (Grt-2) с мозаичной зональностью в экзоскарне и хлоритом, карбонатом и кварцем, обрастающими и рассекающими гранат по трещинам; г – гранат-2 с мозаичной зональностью и корродированное зерно диопсида (Di) в эндоскарне, обрастающие карбонатом и кварцем; д – реакционная кайма на контакте граната-2 с секториальной зональностью и титанистого граната-3 (Grt-3) в эндоскарне, которую пересекает и обрастает хлорит; е – гранат-3 с секториальной зональностью в ассоциации с хлоритом и карбонатом в эндоскарне.

Фотографии в отраженных электронах.

Fig. 5. Garnets and associated minerals of the Novonikolaevskoe deposit: а – garnet-1 (Grt-1) with oscillatory zoning crossed by chlorite (Chl), quartz (Qtz) and carbonate (Carb) veinlet in exoskarn; б – garnet-1 (Grt-1) with oscillatory zoning overgrown by garnet-2 (Grt-2) with sectorial zoning in exoskarn; в – veinlet-like garnet-2 (Grt-2) with mosaic zoning in exoskarn and chlorite (Chl), carbonate (Carb) and quartz (Qtz) overgrowing and crossing the garnets along fractures; г – garnet-2 (Grt-2) with mosaic zoning and corroded diopside (Di) grain in endoskarn, which are overgrown and crossed by carbonate (Carb) and quartz (Qtz); д – reaction rim at the contact of garnet-2 (Grt-2) with sectorial zoning and Ti-bearing garnet-3 (Grt-3) in endoskarn, which is overgrown and crossed by chlorite (Chl); е – garnet-3 (Grt-3) with sectorial zoning in assemblage with chlorite and carbonate in endoskarn.

BSE images.

Таблица 1. Состав граната Новониколаевского месторождения
Table 1. Chemical composition of garnet at the Novonikolaevskoe deposit

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
	Содержание, мас. %																							
Na ₂ O	—	—	—	0.11	—	—	0.16	0.27	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
MgO	0.20	—	—	0.11	0.27	0.06	0.20	0.21	—	0.20	0.20	—	0.27	0.18	—	—	0.21	—	0.39	0.62	—	—	—	—
MnO	0.16	0.27	0.15	0.18	—	0.24	0.09	—	0.25	0.10	0.13	0.24	0.09	0.07	0.82	0.16	0.11	0.17	0.29	0.08	0.21	0.24	0.22	0.22
FeO _{общ}	27.63	17.55	19.34	15.94	27.99	13.06	27.48	23.50	15.76	26.13	26.30	21.88	26.59	22.03	27.15	19.95	26.66	26.51	6.00	12.62	12.11	6.22	6.42	6.42
CaO	32.48	34.55	34.42	34.51	32.97	35.14	32.55	32.88	32.82	31.44	31.52	32.93	31.97	32.73	31.20	32.97	32.16	31.74	35.46	34.57	34.86	34.99	34.81	34.81
Cr ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.02	0.17	—	—	—	—
Al ₂ O ₃	0.12	8.80	7.41	9.98	0.13	12.49	0.11	3.32	9.42	0.38	0.19	4.78	0.21	4.34	0.32	6.21	0.54	0.28	17.29	9.98	12.44	18.31	18.30	18.30
TiO ₂	—	—	—	0.10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.09	—	—	0.41	2.40	0.65	0.33	0.29	0.29
SiO ₂	34.74	35.69	37.03	37.17	35.25	37.53	35.78	36.45	35.52	34.56	35.53	35.65	35.80	36.19	35.10	37.02	35.37	35.39	38.67	37.01	38.32	39.18	39.22	39.22
Сумма	95.33	96.86	98.35	98.10	96.61	98.52	96.37	98.21	94.72	93.96	96.02	95.92	95.39	97.19	95.41	97.16	96.70	95.93	98.53	97.45	98.90	99.77	99.70	99.70

Формульные коэффициенты (расчет на 8 катионов)

A ₃	Na	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Mg	0.03	0.00	0.01	0.03	0.01	0.03	0.03	0.00	0.03	0.03	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.05	0.07	0.04	0.06	0.05	0.05
	Mn	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.06	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
	Fe ²⁺	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03	0.01	0.01	0.02	0.04	0.06	0.01	0.03	0.00	0.00	0.01	0.06	0.08	0.08
	Ca	2.99	3.02	2.98	2.96	2.99	2.98	2.95	2.96	2.96	2.94	2.97	2.95	2.95	2.90	2.93	2.96	2.96	2.94	2.98	2.94	2.87	2.85	2.85
	Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	Al ^{VI}	0.00	0.76	0.70	0.92	0.01	1.13	0.01	0.33	0.92	0.04	0.47	0.02	0.43	0.03	0.61	0.05	0.03	1.58	0.93	1.15	1.64	1.65	1.65
	Fe ³⁺	1.98	1.20	1.30	1.07	1.98	1.95	1.64	1.08	1.92	1.89	1.53	1.90	1.53	1.93	1.32	1.91	1.90	0.39	0.85	0.79	0.34	0.33	0.33
	Ti	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.15	0.04	0.02	0.02	0.02
	Al ^{IV}	0.01	0.09	0.01	0.02	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
	Si	2.98	2.91	2.99	2.98	2.98	3.03	3.03	2.99	3.04	3.09	3.00	3.08	3.04	3.04	3.07	3.04	3.08	3.00	2.98	3.02	3.00	3.00	3.00

Таблица 1. Продолжение

Table 1. Continuation

Оксиды	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	
	Содержание мас. %																						
Na ₂ O	—	—	—	—	0.16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.09	—	—	—	—	—	—	—
MgO	0.47	0.59	0.36	0.21	0.08	—	0.22	0.08	0.20	—	—	0.25	—	0.12	0.12	0.08	0.17	0.51	0.26	—	—	—	0.66
MnO	0.27	0.19	0.16	0.08	0.13	0.64	—	0.12	0.42	0.93	0.40	0.27	0.65	0.07	0.25	0.29	0.11	—	—	—	—	—	0.08
FeO _{общ}	6.01	11.04	11.48	22.12	23.54	27.36	26.98	12.55	13.97	19.43	25.06	15.46	28.14	23.21	25.15	25.47	19.91	16.35	17.74	18.01	17.69	2.36	2.36
CaO	34.60	34.96	34.29	33.22	31.71	32.03	31.98	33.73	33.71	32.14	31.57	33.82	31.50	32.64	31.16	31.14	33.11	33.83	34.06	33.3	31.87	35.93	35.93
Cr ₂ O ₃	—	—	—	—	0.07	—	0.08	—	—	—	—	—	—	—	0.10	—	—	—	—	—	—	—	—
Al ₂ O ₃	18.07	14.08	13.20	4.45	4.69	0.23	—	11.97	11.22	6.79	2.54	9.91	0.07	3.12	3.55	3.23	6.10	8.59	8.02	6.6	6.43	20.61	20.61
TiO ₂	0.29	0.30	0.43	0.29	0.25	—	—	0.15	0.18	0.10	0.29	0.30	—	0.22	0.60	0.48	0.54	3.44	1.44	2.09	2.66	—	—
SiO ₂	38.92	38.38	37.19	35.92	35.86	35.74	35.00	37.48	37.54	36.35	35.49	37.02	34.45	35.26	35.82	35.71	36.04	35.63	36.66	32.8	32.69	39.57	39.57
V ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.08	—	—	—	—
Сумма	98.63	99.54	97.19	96.29	96.49	97.65	94.27	96.73	98.09	96.45	96.29	97.04	95.97	95.93	97.99	96.50	95.98	98.43	98.18	92.78	92.24	99.21	99.21

Формульные коэффициенты (расчет на 8 катионов)

Таблица 2. Медианное, минимальное и максимальное содержание некоторых примесных оксидов в гранатах разных генераций Новониколаевского месторождения (мас. %)
 Table 2. Median, minimum and maximum content of some trace oxides in various generation garnets at the Novonikolaevskoe deposit (wt. %)

Генерация граната	Тип	n	TiO ₂		MgO		MnO		Cr ₂ O ₃		Na ₂ O		V ₂ O ₅	
			мин.	макс.	мед.	макс.	мин.	макс.	мед.	макс.	мин.	макс.	мед.	макс.
1	Экзоскарны	18	—	0.00	0.10	—	0.15	0.27	—	0.00	0.27	—	0.00	—
2	Эндоскарны	8	0.29	0.37	2.40	0.31	0.46	0.62	—	0.00	0.17	—	0.00	0.08
	Экзоскарны	14	—	0.24	0.60	—	0.10	0.25	—	0.00	0.10	—	0.00	—
3	Эндоскарны	4	1.44	2.38	3.44	—	0.39	0.90	—	0.00	—	—	0.00	0.08

Примечание. Прочерк – ниже предела обнаружения; n – число замеров; мин., мед., макс. – минимальное, медианное и максимальное содержания, соответственно.

Note. Dash – below detection limit; n – number of measurements; мин., мед., макс. – minimum, median and maximum contents, respectively.

в пределах 0.09–0.16 мас. % NaO и 0.07–0.1 мас. % Cr₂O₃ (табл. 2). Гранаты второй генерации обладают более широким диапазоном составов, чем гранаты первой, в некоторых случаях имея крайне глинозёмистый состав до Grs₈₃ (рис. 6Б).

Гранат третьей генерации (Grt-3) встречается в эндоскарнах. В шлифах он образует желтоватые ксеноморфные зерна размером 50–100 мкм (рис. 4Г). Гранат-3 изотропен и имеет секториальную зональность (рис. 5Е). Состав граната третьей генерации соответствует And_{55–65} (табл. 1, анализы 41–44, рис. 8А). При обрастании граната-2 гранатом-3 зафиксировано образование более глинозёмистой и магнезиальной реакционной каймы, по составу отвечающей And₈ (табл. 1, анализ 45, рис. 5Д, Е). При этом состав граната-2 в данном случае соответствует And_{16–17} (табл. 1, анализы 23, 24), а граната-3 – And_{55–59} (табл. 1, анализы 41, 42). Медианное содержание MgO в гранатах третьей генерации составляет 0.39 мас. % (до 0.9 мас. %) и TiO₂ – 2.38 мас. % (до 3.44 мас. %) (табл. 2). Гранаты третьей генерации занимают промежуточное положение в поле составов двух более ранних генераций гранатов (рис. 6Б).

ОБСУЖДЕНИЕ

На Новониколаевском месторождении гранаты по составу относятся к серии андрадит-гроссуляр, характерной для скарных месторождений (Meinert, 1992). Общий состав гранатов из эндоскарнов соответствует And_{17–65}, гранатов из экзоскарнов – And_{40–98} (рис. 6Б). По данным (Грабежев и др., 2005; Корякина, 2022, 2024; Корякина, Плотинская, 2022) гранат из эндоскарнов Тарутинского месторождения имеет состав And_{42–77}, экзоскарнов – And_{60–98} (рис. 6Б). Для эндоскарнов Гумёшевского месторождения характерен гранат состава And_{18–19}, для экзоскарнов – And_{67–92} (Грабежев и др., 2005) (рис. 6В). В экзоскарнах Новониколаевского месторождения обнаружено небольшое количество умеренно железистых (содержание Fe³⁺ или андрадитового минала) гранатов And_{40–45} второй генерации и And_{43–54} первой генерации (табл. 1, анализы 4, 6, 9, 31, 32), которые не встречаются в экзоскарнах Тарутинского и Гумёшевского месторождений (Грабежев и др., 2005; Корякина, 2022, 2024) (рис. 6Б, В, Г).

В то же время, наблюдается последовательное увеличение содержания TiO₂ в гранатах Новониколаевского месторождения от ранней генерации

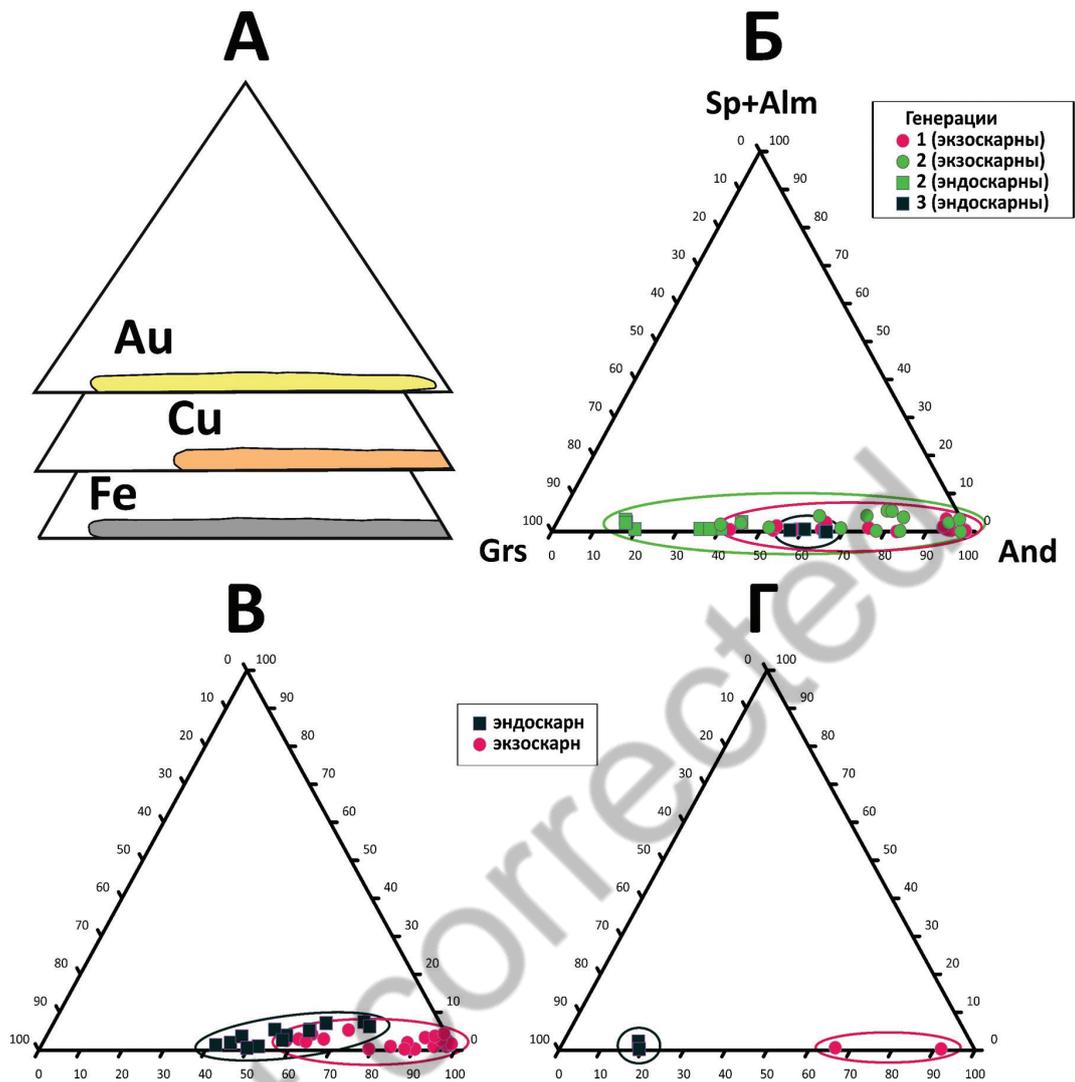


Рис. 6. Составы гранатов из основных геолого-промышленных типов скарнов по данным (Meinert, 1992) (А), а также Новониколаевского (Б), Тарутинского (В) и Гумёшевского (Г) месторождений.

В, Г – по данным (Грабежев и др., 2005; Корякина и др., 2022, 2024; Корякина, Плотинская, 2022); Г – по данным (Грабежев и др., 2005).

Fig. 6. Compositions of garnets main geological-economic skarn types after (Meinert, 1992) (A) and Novonikolaevskoe (B), Tarutino (C) and Gumeshki (G) deposits.

В, Г – after (Grabezhev et al., 2005; Koryakina et al., 2022, 2024; Koryakina, Plotinskaya, 2022); Г – after (Grabezhev et al., 2005).

к поздней (рис. 7А): для граната-1 медианные значения близки нулю, для граната-2 из экзо- и эндоскарнов они близки (0.24 и 0.37 мас. %, соответственно), для граната-3 составляют 2.38 мас. %. По данным (Грабежев и др., 2005; Корякина, 2024) на Тарутинском месторождении (рис. 7Б) медианное содержание TiO_2 в гранатах из экзоскарнов близко к нулю (в единичном случае 0.31 мас. %), в гранатах из эндоскарнов – 0.21 мас. % (в единичном случае 1.02 мас. %), а на Гумёшевском месторождении содержание TiO_2 в гранатах из эндо- и экзоскарнов близко: 0.03 и 0.06 мас. %, соответственно.

Титансодержащие гранаты широко распространены в природе, в том числе и на месторождениях скарнового типа (Гриценко, 2018; Огородова и др., 2022). Гранаты из ультраосновных щелочных комплексов и карбонатитов характеризуются более высокими содержаниями TiO_2 по сравнению со скарновыми (>70% и до 25% моримотоитового и шорломитового миналов в сумме, соответственно) (Стативко и др., 2023). Для большинства скарновых месторождений мира характерны содержания TiO_2 в гранате от первых десятых до первых массовых процентов (Fei et al., 2019; Tian et al., 2019;

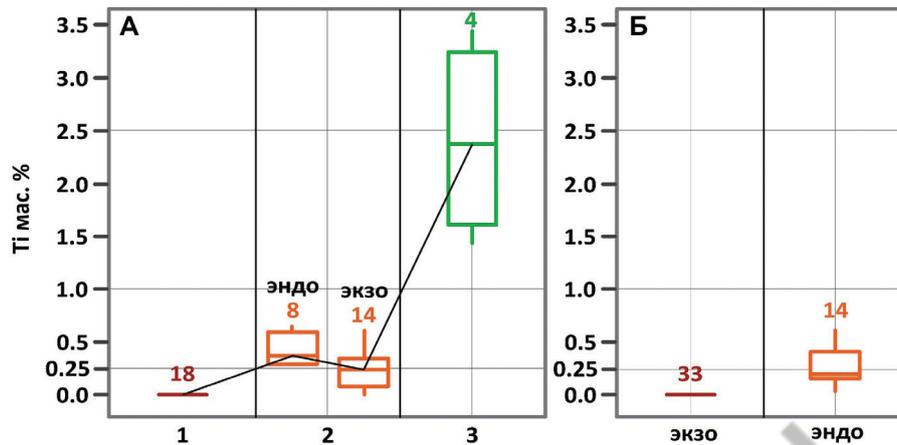


Рис. 7. Распределение медианных содержаний TiO_2 в гранатах Новониколаевского (А) и Тарутинского (Б) месторождений.

1, 2, 3 – генерации граната. Прямоугольники – интерквартильный разброс, «усы» – максимальное и минимальное значения без выбросов. Числа над прямоугольниками – число замеров. Б – по данным (Грабежев, 2005; Корякина, 2024).

Fig. 7. Distribution of median TiO_2 content in garnets from the Novonikolaevskoe (A) and Tarutino (B) deposits.

1, 2, 3 – garnet generations. Rectangles – interquartile range, whiskers – maximum and minimum values excluding outliers. Numbers above the rectangles – number of measurements. B – after (Grabezhev, 2005; Koryakina, 2024).

Jiang et al., 2020; Duan et al., 2020; Стативко и др., 2023). С увеличением температуры формирования содержание TiO_2 в гранате возрастает (Ackerson, 2017), однако на это также влияют давление, содержание гроссуляровой молекулы и Са в гранате и др. По классификации (Жариков, 1968) эпидот-содержащие скарны – самая низкотемпературная фация известковых скарнов. На Новониколаевском месторождении можно выделить три фации проградных скарнов: эпидот-гранатовую, гранатовую без эпидота и пироксен-гранатовую. Самые высокие содержания TiO_2 в гранатах Новониколаевского месторождения зафиксированы в гранатовом скарне без эпидота, что косвенно подтверждает более высокие температуры образования титанистых гранатов. Увеличение содержания TiO_2 от ранней генерации граната к поздней, возможно, говорит о последовательном увеличении температуры при формировании скарновых гранатов Новониколаевского месторождения.

Таким образом, присутствие умеренно железистых гранатов в экзоскарнах первых двух генераций и повышенные содержания TiO_2 в гранатах третьей генерации, вероятно, могут свидетельствовать об относительно более высокотемпературных условиях, определяющих высокую растворимость алюминий- и титансодержащих комплексов (Подлесский, 1979) на проградной скарновой стадии Новониколаевского месторождения, по сравнению с Тарутинским и Гумёшевским месторождения-

ми (Жариков, 1968; Грабежев и др., 2005). Другой причиной наличия умеренно железистых гранатов экзоскарнов на Новониколаевском месторождении может являться относительно более низкий окислительный потенциал флюида (Жариков, 1968; Грабежев и др., 2005).

На Новониколаевском месторождении распространены эпидотсодержащие скарны с гранатом, но редко встречаются пироксен-гранатовые скарны (разведочный профиль № 6) и скарны, не содержащие эпидота, с титанистым гранатом-3 (разведочный профиль № 15) (рис. 2), что по классификации (Жариков, 1968) позволяет предположить самые высокие температуры образования скарновых гранатов именно в районе профилей №№ 6 и 15.

На треугольных диаграммах, предложенных в работе (Meinert, 1992), составы гранатов Новониколаевского и Гумёшевского месторождений попадают в поле Au-Fe-Cu скарновых месторождений, а Тарутинского – Cu скарновых месторождений (рис. 6). Во второй генерации гранатов Новониколаевского месторождения встречается существенно гроссуляровый гранат (до Gr_{83}). Такое высокое содержание Al_2O_3 в гранате характерно для Гумёшевского месторождения (до Gr_{80}), но не характерно для Тарутинского (до Gr_{57}) (рис. 6Б, В, Г). На Новониколаевском и Гумёшевском месторождениях часто встречаются массивные и густовкрапленные магнетитовые руды (Фёдоров, 2016) в отличие от Тарутинского месторождения, где магнетит пре-

имущественно образует редкую вкрапленность в скарнах (Корякина, 2024). Распространенность магнетита, для образования которого помимо Fe^{3+} требуется неокисленное Fe^{2+} , и который обычно на скарновых месторождениях образуется в раннюю ретроградную (апоскарновую) стадию (Жариков и др., 1998), вместе с высоким содержанием TiO_2 в гранате третьей генерации может свидетельствовать об относительно слабом окислительном потенциале флюида на поздней проградной и ретроградной стадии Новониколаевского месторождения и на ретроградной стадии Гумёшевского месторождения по сравнению с Тарутинским месторождением.

ВЫВОДЫ

Таким образом, на Новониколаевском месторождении установлено три генерации граната, которые относятся к андрадит-гроссуляровой серии, характерной для скарновых месторождений. Содержание TiO_2 в гранатах и умеренно железистый состав некоторых гранатов Новониколаевского месторождения, возможно, свидетельствуют об увеличении температуры при формировании гранатов на проградной стадии от ранней генерации к поздней, а также об относительно более высокотемпературных условиях при формировании гранатов Новониколаевского месторождения по сравнению с гранатами Тарутинского и Гумёшевского месторождений. Другой причиной наличия умеренно железистых гранатов экзоскарнов может являться относительно слабый окислительный потенциал флюида, который, вероятно, также повлиял и на образование большого количества магнетита на Новониколаевском месторождении в отличие от Тарутинского месторождения. Подчиненное значение пироксена относительно эпидота в скарнах говорит об относительно низкотемпературных условиях формирования скарнов на трёх рассматриваемых месторождениях. Гранаты Новониколаевского и Гумёшевского месторождений характерны для Au-Fe-Cu скарновых объектов, а Тарутинского – Cu скарновых. Этот и вышеперечисленные признаки говорят о сходстве составов гранатов трех месторождений и позволяют предположить, что Новониколаевское месторождение относится к скарново-медно-порфировому типу.

ЛИТЕРАТУРА

- Белгородский Е.А., Черкашов С.А., Грабежев А.И., Шаргородский Б.М. (1991) Медно-порфиновый Новониколаевский рудный узел. Свердловск, УрО АН СССР, 54 с.
- Гирфанов М.М., Сергеева Н.Е., Шишаков В.Б. (1991) Рудно-метасоматическая зональность Михеевского медно-порфирового месторождения на Южном Урале. *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*, 5, 75–79.
- Горбунов А.А., Аликин О.В., Захарова А.А., Гусева Т.А., Рудашевский В.Н., Гемель В.А. (2019) Особенности минералогии руд Михеевского месторождения, Новониколаевского и Западного участков (Южный Урал). *Уральская минералогическая школа-2019*. Екатеринбург, УГГУ, 41–44.
- Грабежев А.И., Гмыра В.Г., Вигорова В.Г., Пальгуева Г.В. (2005) Гранаты из скарнов Гумёшевского и Тарутинского скарново-медно-порфиновых месторождений. *Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества*, 4, 55–60.
- Грабежев А.И., Ронкин Ю.Л. (2011) U-Pb возраст цирконов из рудоносных гранитоидов медно-порфиновых месторождений Южного Урала. *Литосфера*, 11(3), 104–116.
- Гриценко Ю.Д. (2018) Коллекция титановых гранатов Минералогического музея имени А.Е. Ферсмана РАН. *Новые данные о минералах*, 52 (1), 3–5.
- Жариков В.А. (1968) Скарновые месторождения. Генезис эндогенных рудных месторождений. М., Недра, 220–302.
- Жариков В.А., Русинов В.Л., Маракушев А.А., Зарайский Г.П., Омеляненко Б.И. (1998) Метасоматизм и метасоматические породы. М., Научный мир, 489 с.
- Корякина А.В. (2024) Минералого-геохимические особенности Тарутинского медно-скарнового месторождения (Южный Урал). Выпускная квалификационная магистерская работа. Москва, МГУ, 144 с.
- Корякина А.В., Грознова Е.О., Плотинская О.Ю. (2022) Особенности минерального состава и условия образования на Тарутинском медном месторождении (Южный Урал): первые данные. *Металлогения древних и современных океанов-2022. От вещественного состава к моделям и прогнозированию месторождений*. Миасс, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 66–69.
- Корякина А.В., Плотинская О.Ю. (2022) Особенности минерального состава скарновых пород на Тарутинском медном месторождении (Южный Урал). *Уральская минералогическая школа-2022*. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 88–90.
- Огородова Л.П., Гриценко Ю.Д., Вигасина М.Ф., Русаков В.С., Мельчакова Л.В., Бычков А.Ю., Ксенофонов Д.А. (2022) Физико-химическое изучение титансодержащих гранатов. *Геохимия*, 67 (4), 359–375. <https://doi.org/10.31857/S0016752522030050>

- Плотинская О.Ю. (2023) Порфиново-эпитермаль-ные системы Урала: источники вещества, эволюция и зональность. Дисс. на соиск. степ. док. геол.-мин. наук. Москва, ИГЕМ РАН, 312 с.
- Плотинская О.Ю., Грабежев А.И., Зелтманн Р. (2015) Рений в рудах Михеевского Мо-Си-порфинового месторождения, Южный Урал. *Геология рудных месторождений*, 57 (2), 132–147. <https://doi.org/10.7868/S0016777015020057>
- Плотинская О.Ю., Ковальчук Е.В. (2022) Блѣкые руды Си-(Мо)-порфириновых месторождений Урала. *Минералогия*, 8 (3), 5–22. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2022-8-3-1>
- Подлесский К.В. (1979) Скарны и околорудные метасоматиты железорудных месторождений Урала и Кавказа. М., Наука, 204 с.
- Рыбалка А.В., Кашубина Т.В., Петров Г.А., Кашубин С.Н. (2007) Среднеуральский трансект: новые данные по глубинному строению Урала. *Модели земной коры и верхней мантии по результатам глубинного сейсмопрофилирования*. СПб, ВСЕГЕИ, 186–191.
- Стативко В.С., Скублов С.Г., Смоленский В.В., Кузнецов А.Б. (2023) Редкие и редкоземельные элементы в гранатах из силикатно-карбонатных образований Кусинско-Копанского комплекса (Южный Урал). *Литосфера*, 23 (2), 225–246. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-2-225-246>
- Тевелев А.В., Кошелева И.А., Бурштейн Е.Ф. и др. (2018) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Издание второе. Серия Южно-Уральская. Лист N-41-XXV (Карталы). Объяснительная записка. М., Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 175 с.
- Фѣдоров С.А. (2016) Типоморфные особенности магнетитовых руд Гумѣшевского медно-скарнового месторождения. *XVII Уральская молодежная научная школа по геофизике*. Екатеринбург, Институт геофизики УрО РАН, 182–184.
- Шаргородский Б.М., Новиков И.М. и др. (2005ф) Оценочные работы на Михеевском месторождении медно-порфириновых руд. Челябинск, ЗАО «Михеевский ГОК», 1160 с.
- Шаргородский Б.М., Новиков И.М., Аксенов С.А. (2005) Михеевское месторождение медно-порфириновых руд на Южном Урале. *Отечественная геология*, 2, 57–61.
- Ackerson M.R., Tailby N.D., Watson E.B. (2017) XAFS spectroscopic study of Ti coordination in garnet. *American Mineralogist*, 102, 173–183. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5633>
- Duan X.X., Ju Y.F., Chen B., Wang Z.Q. (2020) Garnet geochemistry of reduced skarn system: implications for fluid evolution and skarn formation of the Zhuxiling W (Mo) deposit, China. *Minerals*, 10(110), 1024. <https://doi.org/10.3390/min10111024>
- Fei X., Zhang Z., Cheng Z., Santosh M. (2019) Factors controlling the crystal morphology and chemistry of garnet in skarn deposits: A case study from the Cuihongshan polymetallic deposit, Lesser Xing'an Range, NE China. *American Mineralogist*, 104(10), 1455–1468. <https://doi.org/10.2138/am-2019-6968>
- Jiang X., Chen X., Zheng Y., Gao S., Zhang Z., Zhang Y., Zhang S. (2020) Decoding the oxygen fugacity of ore-forming fluids from garnet chemistry, the Longgen skarn Pb-Zn deposit, Tibet. *Ore Geology Reviews*, 126 (5146). <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103770>
- Meinert L.D. (1992) Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada*, 19, 145–162.
- Plotinskaya O.Yu., Azovskova O.B., Abramov S.S., Groznova E.O., Novoselov K.A., Seltmann R., Spratt J. (2018) Precious metals assemblages at the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals, Russia) as proxies of epithermal overprinting. *Ore Geology Reviews*, 94, 239–260. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.01.025>
- Puchkov V.N. (2017) General features relating to the occurrence of mineral deposits in the Urals: What, where, when and why. *Ore Geology Reviews*, 85, 4–29. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.01.005>
- Tian Z.D., Leng C.B., Zhang X.C., Zafar T., Zhang L.J., Hong W., Lai C.K. (2019) Chemical composition, genesis and exploration implication of garnet from the Hongshan Cu-Mo skarn deposit, SW China. *Ore Geology Reviews*, 112, 103016. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103016>

REFERENCES

- Ackerson M.R., Tailby N.D., Watson E.B. (2017) XAFS spectroscopic study of Ti coordination in garnet. *American Mineralogist*, 102, 173–183. <https://doi.org/10.2138/am-2017-5633>
- Belgorodsky E.A., Cherkashov S.A., Grabezhev A.I., Shargorodsky B.M. (1991) Porphyry copper Novonikolayevsky ore cluster. Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 54 p. (in Russian)
- Duan X.X., Ju Y.F., Chen B., Wang Z.Q. (2020) Garnet geochemistry of reduced skarn system: implications for fluid evolution and skarn formation of the Zhuxiling W (Mo) deposit, China. *Minerals*, 10(110), 1024. <https://doi.org/10.3390/min10111024>
- Fedorov S.A. (2016) Typomorphic features of magnetite ores of the Gumeshki copper skarn deposit. *XVII Uralskaya molodezhnaya nauchnaya shkola po geofizike (XVII Urals Youth Scientific School on Geophysics)*. Yekaterinburg, Institut geofiziki UrO RAN, p. 182–184. (in Russian)
- Fei X., Zhang Z., Cheng Z., Santosh M. (2019) Factors controlling the crystal morphology and chemistry of garnet in skarn deposits: A case study from the Cuihongshan polymetallic deposit, Lesser Xing'an Range, NE China. *American Mineralogist*, 104(10), 1455–1468. <https://doi.org/10.2138/am-2019-6968>

- Girfanov M.M., Sergeeva N.E., Shishakov V.B. (1991) Ore-metasomatic zoning of the Mikheevskoe porphyry copper deposit in the South Urals. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4: Geologiya (Bulletin of the Moscow State University. Series 4: Geology)*, 5, 75–79. (in Russian)
- Gorbunov A.A., Alikin O.V., Zakharova A.A., Guseva T.A., Rudashevsky V.N., Gemel V.A. (2019) Peculiarities of ore mineralogy of the Mikheevskoe deposit and Novonikolaevskoe and Zapadny areas (South Urals). *Uralskaya mineralogicheskaya shkola (Urals Mineralogical School-2019)*. Yekaterinburg, UGGU, 41–44. (in Russian)
- Grabezhev A.I., Gmyra V.G., Vigorova V.G., Palgueva G.V. (2005) Garnets from skarns of the Gumeshki and Tarutino skarn porphyry copper deposits. *Vestnik Uralskogo otdeleniya Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva (Bulletin of the Urals Branch of the Russian Mineralogical Society)*, 4, 55–60. (in Russian)
- Grabezhev A.I., Ronkin Yu.L. (2011) U-Pb age of zircons from ore-bearing granitoids of porphyry copper deposits of the South Urals. *Litosfera (Lithosphere)*, 11(3), 104–116. (in Russian)
- Gritsenko Yu.D. (2018) Collection of Ti garnets from the Fersman Mineralogical Museum of the Russian Academy of Sciences. *Novye dannye o mineralakh (New Data on Minerals)*, 52 (1), 3–5. (in Russian)
- Jiang X., Chen X., Zheng Y., Gao S., Zhang Z., Zhang Y., Zhang S. (2020) Decoding the oxygen fugacity of ore-forming fluids from garnet chemistry, the Longgen skarn Pb-Zn deposit, Tibet. *Ore Geology Reviews*, 126 (5146). <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103770>
- Koryakina A.V. (2024) Mineralogical and geochemical features of the Tarutino copper skarn deposit (South Urals). Master degree thesis. Moscow, MGU, 144 p. (in Russian)
- Koryakina A.V., Groznova E.O., Plotinskaya O.Yu. (2022) Features of mineral composition and formation conditions of the Tarutino copper deposit (South Urals): first data. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2022. Ot veshchestvennogo sostava k modelyam i prognozirovaniyu mestorozhdeniy (Metallogeny of Ancient and Modern oceans-2022. From Composition to Models and Forecast of Deposits)*. Miass, YuU FNTs MiG UrO RAN, 66–69. (in Russian)
- Koryakina A.V., Plotinskaya O.Yu. (2022) Features of mineral composition of skarn rocks at the Tarutino copper deposit (South Urals). *Uralskaya mineralogicheskaya shkola (Urals Mineralogical School-2022)*. Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 88–90. (in Russian)
- Meinert L.D. (1992) Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada*, 19, 145–162.
- Ogorodova L.P., Gritsenko Yu.D., Vigasina M.F., Rusakov V.S., Melchakova L.V., Bychkov A.Yu., Ksenofontov D.A. (2022) Physicochemical study of titanium-bearing garnets. *Geochemistry International*, 67 (4), 363–378. <https://doi.org/10.1134/S0016702922030053>
- Plotinskaya O.Yu. (2023) Porphyry-epithermal systems of the Urals: mineral sources, evolution and zoning. Dissertation of Doctor of Geological-Mineralogical Sciences. Moscow, IGEM RAN, 312 p. (in Russian)
- Plotinskaya O.Yu., Azovskova O.B., Abramov S.S., Groznova E.O., Novoselov K.A., Seltmann R., Spratt J. (2018) Precious metals assemblages at the Mikheevskoe porphyry copper deposit (South Urals, Russia) as proxies of epithermal overprinting. *Ore Geology Reviews*, 94, 239–260. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.01.025>
- Plotinskaya O.Yu., Grabezhev A.I., Zeltmann R. (2015) Rhenium in ores of the Mikheevskoe porphyry Cu-Mo deposit, South Urals. *Geology of Ore Deposits*, 57(2), 118–132. <https://doi.org/10.1134/S1075701515020051>
- Plotinskaya O.Yu., Kovalchuk E.V. (2022) Fahlores of Cu-(Mo) porphyry deposits of the Urals. *Mineralogiya (Mineralogy)*, 8(3), 5–22. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2022-8-3-1> (in Russian)
- Podlessky K.V. (1979) Skarns and metasomatites of iron deposits of the Urals and Caucasus. Moscow, Nauka, 204 p. (in Russian)
- Puchkov V.N. (2017) General features relating to the occurrence of mineral deposits in the Urals: What, where, when and why. *Ore Geology Reviews*, 85, 4–29. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.01.005>
- Rybalka A.V., Kashubina T.V., Petrov G.A., Kashubin S.N. (2007) Central Urals transect: new data on the deep structure of the Urals. *Modeli zemnoy kory i verkhney mantii po rezul'tatam glubinnogo seysmoprofilirovaniya (Models of the Earth's Crust and Upper Mantle Based on Results of Deep Seismic Profiling)*. St. Petersburg, VSEGEI, 186–191. (in Russian)
- Sharгородsky B.M., Novikov I.M. et al. (2005) Unpublished report on evaluation works at the Mikheevskoe porphyry copper deposit. Chelyabinsk, ZAO Mikheevsky GOK, 1160 p. (in Russian)
- Sharгородsky B.M., Novikov I.M., Aksyonov S.A. (2005) Mikheevskoe porphyry copper deposit in the South Urals. *Otechestvennaya geologiya (National Geology)*, 2, 57–61. (in Russian)
- Stativko V.S., Skublov S.G., Smolensky V.V., Kuznetsov A.B. (2023) Rare and rare-earth elements in garnets from silicate-carbonate rocks of the Kusa-Kopansky complex (South Urals). *Litosfera (Lithosphere)*, 23(2), 225–246. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-2-225-246> (in Russian)
- Tevelev A.V., Kosheleva I.A., Burshtein E.F. et al. (2018) State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 200 000. Second edition. South Urals Series. Sheet N-41-XXV (Kartaly). Explanatory Note. Moscow, Moskovsky filial VSEGEI, 175 p. (in Russian)
- Tian Z.D., Leng C.B., Zhang X.C., Zafar T., Zhang L.J., Hong W., Lai C.K. (2019) Chemical composition, genesis and exploration implication of garnet from the Hongshan Cu-Mo skarn deposit, SW China. *Ore Geology Reviews*, 112, 103016. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103016>

Zharikov V.A. (1968) Skarn deposits. Genesis of endogenic ore deposits. Moscow, Nedra, 220–302. (in Russian)

Zharikov V.A., Rusinov V.L., Marakushev A.A., Zharikov G.P., Omelyanenko B.I. (1998) Metasomatism and metasomatic rocks. Moscow, Nauchny mir, 489 p. (in Russian)

Информация об авторах

Хребтиевский Владимир Валерьевич – аспирант, Московский государственный университет, г. Москва, Россия; st064292@gmail.com

Плотинская Ольга Юрьевна – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва, Россия; plotin@igem.ru

not corrected