

УДК 549.743.15(470.53)

DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-3-1

ГЛАУКОСФЕРИТ ИЗ ХРОМИТИТОВ ВОЙКАРО-СЫНЬИНСКОГО МАССИВА (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ) – ПЕРВАЯ ДОСТОВЕРНАЯ НАХОДКА В РОССИИ

Ю.В. Ерохин¹, И.В. Пеков², **Н.В. Вахрушева**¹, П.Б. Ширяев¹, В.О. Япаскерт², С.Н. Бритвин³

¹ Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, ул. Академика Вонсовского, 15, 620110 Екатеринбург, Россия; erokhin-yu@yandex.ru

² Московский государственный университет, Ленинские горы 1, 119991 Москва, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб. 7/9, 199034 Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 23.08.2023 г., принята к печати 11.09.2023 г.

GLAUKOSPHERITE FROM CHROMITITES OF THE VOYKAR-SYNYA MASSIF, POLAR URALS – THE FIRST RELIABLE FIND IN RUSSIA

Yu.V. Erokhin¹, I.V. Pekov², **N.V. Vakhrusheva**¹, P.B. Shiryaev¹, V.O. Yapaskurt², S.N. Britvin³

¹ Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS,

ul. Akademika Vonsovskogo 15, 620110 Yekaterinburg, Russia; erokhin-yu@yandex.ru

² Moscow State University, Leninskie Gory 1, 119991 Moscow, Russia

³ St. Petersburg State University, Universitetskaya nab. 7/9, 199034 St. Petersburg, Russia

Received 23.08.2023, accepted 11.09.2023

Аннотация. В хромититах Бурхойлинского участка, расположенного в северной части Войкаро-Сыньинского гипербазитового массива (Полярный Урал), обнаружены два основных карбоната группы розазита-малахита – глаукосферит и макгиннесит. Они слагают пленки, мелкие кристаллы и сферолиты (до 0.3 мм) зеленого и голубовато-зеленого цвета в кавернах выветрелых хромититов. Находка глаукосферита является первой достоверной для России. Химический состав глаукосферита (мас. %): 25.14 NiO, 0.44 CoO, 0.89 FeO, 34.45 CuO, 7.90 MgO, 21.65 CO₂ (расч.), 8.86 H₂O (расч.), сумма 99.33. Состав отвечает эмпирической формуле, рассчитанной на сумму катионов, равную 2: (Cu_{0.88}Ni_{0.68}Mg_{0.40}Fe_{0.03}Co_{0.01})_{2.00}(CO₃)(OH)₂. Рассчитанные по порошковой рентгенограмме параметры моноклинной элементарной ячейки глаукосферита: $a = 12.070(3) \text{ \AA}$, $b = 9.363(2)$, $c = 3.131(1)$, $\beta = 98.03(2)^\circ$, $V = 350.3(3) \text{ \AA}^3$. Образование глаукосферита и макгиннесита связано с гипергенным разложением сульфидов (пентландита и борнита), рассеянных в хромититах.

Ключевые слова: Полярный Урал, Бурхойлинский участок, Войкаро-Сыньинский массив, хромититы, глаукосферит, макгиннесит.

Abstract. Glaukosphaerite and mcguinnessite (carbonates of the rosasite-malachite group) are found in chromitites of the Burkhoyla area, which is located in the northern part of the Voykar-Synya ultramafic massif (Polar Urals). The minerals form green and bluish-green films, small crystals and spherulites (up to 0.3 mm) in cavities of weathered chromitites. This is the first reliable find of glaukosphaerite in Russia. The chemical composition of glaukosphaerite is as follows (wt %): 25.14 NiO, 0.44 CoO, 0.89 FeO, 34.45 CuO, 7.90 MgO, 21.65 CO₂ (calc.), 8.86 H₂O (calc.), total 99.33. The empirical formula calculated based on the cation sum is (Cu_{0.88}Ni_{0.68}Mg_{0.40}Fe_{0.03}Co_{0.01})_{2.00}(CO₃)(OH)₂. The parameters of the monoclinic unit cell of glaukosphaerite calculated from the powder X-ray diffraction data are: $a = 12.070(3)$, $b = 9.363(2)$, $c = 3.131(1) \text{ \AA}$, $\beta = 98.03(2)^\circ$, $V = 350.3(3) \text{ \AA}^3$. The formation of these carbonates is related to supergene alteration of sulfides (pentlandite and bornite) in chromitites.

Keywords: Polar Urals, Burkhoyla area, Voykar-Synya massif, chromitites, glaukosphaerite, mcguinnessite.

Введение

Глаукосферит $\text{CuNi}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ относится к группе розазита-малахита, в которую также входят розазит $\text{CuZn}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ (Lovisato, 1908), малахит $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ (известен с древних времен), колвезит $\text{CuCo}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ (Deliens, Piret, 1980), покровскит $\text{Mg}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ (Иванов и др., 1984), чукановит $\text{Fe}^{2+}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ (Pekov et al., 2007), наллагайнит $\text{Ni}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ (Nickel, Berry, 1981), макгиннессит $\text{MgCu}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ (Erd et al., 1981), перкьяцциит $\text{Co}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ (Barbaro et al., 2023) и парадшашварит $\text{Zn}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ (Fehér et al., 2015). Идеализированные формулы «двухкатионных» минералов этой группы – розазита, глаукосферита, колвезита и макгиннессита записаны здесь в соответствии со структурными данными, которые указывают на упорядочение катионов Zn^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} и Mg^{2+} с Cu^{2+} (Perchiazzi, 2006; Perchiazzi, Merlino, 2006; Perchiazzi et al., 2018). В этой связи самостоятельность минерального вида цинкрозазита (Strunz, 1959), для которого ранее предлагалась формула $(\text{Zn,Cu})_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$, сомнительна: судя по всему, это высокоцинкистая разновидность розазита.

Глаукосферит впервые был установлен в зоне гипергенеза никелевых месторождений, расположенных близ г. Камбалда (Западная Австралия), в ассоциации с гётитом, никелистым малахитом, паратакамитом, магнезитом, гипсом, глинистыми минералами и вторичным кварцем (Pryce, Just, 1974). В дальнейшем глаукосферит описывался в зоне окисления медных руд в Заире (Deliens, 1975), серпентинитах Японии (Matsubara, Kato, 1993) и других местах. Данный карбонат считается редким вторичным минералом: в настоящее время, по информации вебсайта www.mindat.org (дата обращения 30.06.2023), в мире известно всего около 30 мест находок глаукосферита, причем около их трети сосредоточено в Западной Австралии.

В России глаукосферит, насколько это известно авторам, не описывался. Отметим, что в Родионовском хромитовом месторождении близ г. Верхний Уфалей (Южный Урал) в ассоциации с накау-

риитом упомянут карбонат промежуточного состава между глаукосферитом и наллайганитом, который развивается по никелистой меди (Попов и др., 2013). На основе полуколичественных электронно-микроскопических данных авторы процитированной работы отнесли этот карбонат к наллайганиту, хотя, судя по соотношениям интенсивностей линий Cu и Ni в приведенном энергодисперсионном спектре, это скорее глаукосферит. Сколь-нибудь подробного его описания и каких-либо количественных аналитических данных для этого минерала В.А. Попов с соавторами (2013) не привели, в т. ч. по причине микронного размера его обособлений.

Нами сделана находка глаукосферита на Бурхойлинском участке в северной части Войкаро-Сыньинского гипербазитового массива (Полярный Урал). Она, по всей видимости, является первой достоверной находкой этого минерала в Российской Федерации.

Краткая геологическая характеристика места находки глаукосферита

Бурхойлинский участок располагается в северной части Войкаро-Сыньинского массива, недалеко от южного контакта гипербазитов с габброидами. Он расположен в междуречье р. Малая Хараматалоу и р. Бурхойла (Ямало-Ненецкий Автономный округ, Шурышкарский р-н). Хромовые руды локализованы в небольших дунитовых телах, окруженных породами дунит-гарцбургитового комплекса с содержанием дунитовой составляющей 10–30 %, редко – более 30 % (рис. 1). Мощность дунитовых тел достигает 10–20 м. В северной части участка по гарцбургитам с невысоким содержанием дунитов (<10 %) развиты рассланцованные оливин-антигоритовые породы (так называемые «войкаритовые сланцы»), сменяющиеся к югу амфибол-оливин-антигоритовыми породами и амфиболизированными гарцбургитами.

Бурхойлинское рудопроявление хромитов локализовано в амфиболизированных гарцбургитах с сеткой дунитовых жил. Содержание амфиболизи-

Для цитирования: Ерохин Ю.В., Пеков И.В., Вахрушева Н.В., Ширияев П.Б., Япаскерт В.О., Бритвин С.Н. Глаукосферит из хромититов Войкаро-Сыньинского массива (Полярный Урал) – первая достоверная находка в России. *Минералогия*, 9(3), 5–14. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-3-1

For citation: Erokhin Yu.V., Pekov I.V., Vakhrusheva N.V., Shiryayev P.B., Yapaskurt V.O., Britvin S.N. Glaukosphaerite from chromitites of the Voykar-Synya massif, Polar Urals – the first reliable find in Russia. *Mineralogy*, 9(3), 5–14. DOI: 10.35597/2313-545X-2023-9-3-1.

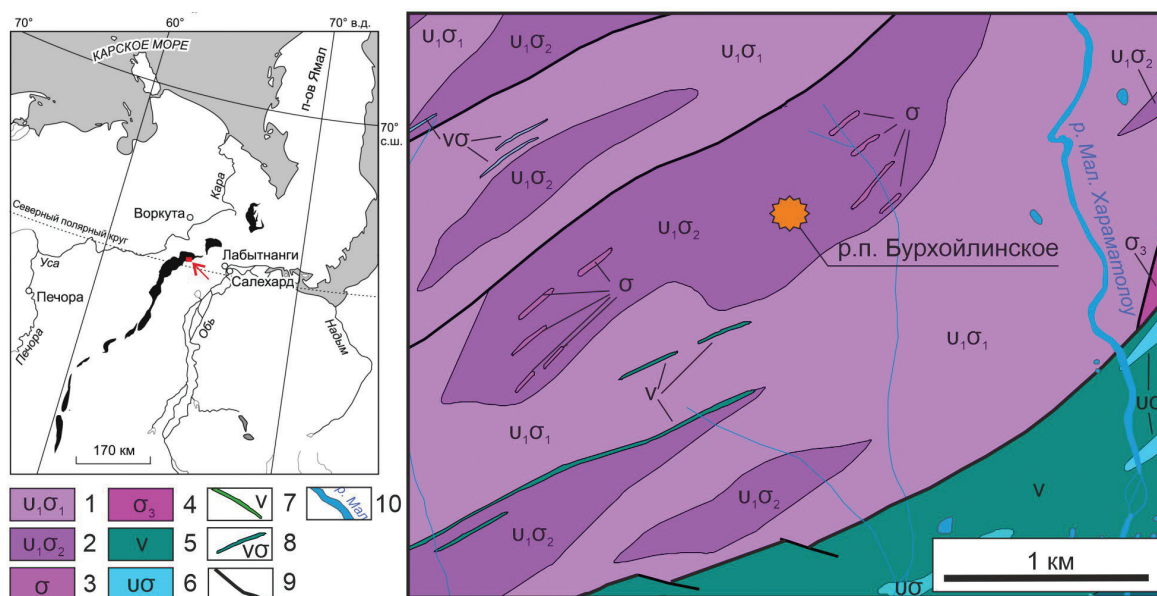


Рис. 1. Геологическая схема Бурхойлинского участка Войкаро-Сыньинского массива (Полярный Урал), по (Ивановский, Овечкин, 1999; Савельева и др., 2015).

1–3 – породы дунит-гарцбургитового комплекса: 1, 2 – количество дунитов 10–30 % (1) и 30–50 % (2), 3 – дуниты; 4 – дуниты полосчатого дунит-верлит-клинопироксенитового комплекса; 5 – габбро-амфиболиты; 6 – верлиты; 7 – жильное габбро; 8 – жильные пироксениты; 9 – тектонические нарушения; 10 – реки.

Fig. 1. Geological scheme of the Burkhoyla area of the Voykar-Synya massif (Polar Urals), after (Ivanovsky, Ovechkin, 1999; Savelyeva et al., 2015).

1–3 – rocks of the dunite-harzburgite complex: 1, 2 – amount of dunite of 10–30 % (1) and 30–50 % (2); 3 – dunite; 4 – dunite of banded dunite-wehrlite-clinopyroxenite complex; 5 – gabbroamphibolite; 6 – wehrlite; 7 – vein gabbro; 8 – vein pyroxenite; 9 – faults; 10 – rivers.

рованного ортопироксена в гарцбургитах высокое – около 30 %. Количество дунитов в дунит-гарцбургитовом комплексе здесь составляет 30–40 %. Амфиболитизированные гарцбургиты к югу и северу сменяются метаморфическими амфибол-оливин-антигоритовыми породами, которые вместе с редкими ветвящимися прожилками клинопироксенитов развиты в южной части участка, вплоть до контакта с габброидами (Ивановский, Овечкин, 1999; Савельева и др., 2015).

Бурхойлинское рудопроявление представлено серией линзовидных хромитовых тел, образованных в сколовых зонах линейных дунитовых образований среди гарцбургитов. Всего выделяется одиннадцать рудных тел, из которых семь имеют мощность более 1 м.

Исследованные авторами хромовые руды отобраны из рудного тела № 13 (географические координаты по GPS-навигатору – N 66°39'20.0", E 64°39'16.0"), расположенного на восточном фланге рудоносной зоны Бурхойлинского рудопроявления. Форма рудного тела линзовидная, длина тела – 14 м, средняя мощность – 1.5 м. Азимут прости-

рания тела 60–65°, падение ЮЮВ. Руды густовкрапленные до сплошных (рис. 2), среднезернистые, равномернозернистые.

С поверхности хромитовые руды выветрены, и в некоторых местах в них образовались небольшие каверны, приуроченные к хлоритовому цементу, в которых встречаются пленки, мелкие кристаллы и сферолиты зеленого цвета. При инструментальном изучении их полевое определение как «малахит» не подтвердилось, поскольку они оказались сложены, в основном, глаукосферитом.

Краткая минералогическая характеристика хромититов Бурхойлинского участка

Хромитовые руды Бурхойлинского участка относятся к глиноземистому магнезиальному типу. Содержание Cr_2O_3 в рудообразующем хромшпинелиде составляет 40–42 мас. %, Al_2O_3 – 26–28 мас. % (Вахрушева, Алимов, 2014). По другим данным, диапазон содержаний Cr_2O_3 составляет 37–44 мас. %, Al_2O_3 – 22–29 мас. % (Никольская и др., 2021); Cr_2O_3 – 39–48 мас. %, Al_2O_3 – 16–26 мас. % (Перевозчи-



Рис. 2. Сплошная хромитовая руда Бурхойлинского участка.

Фото Н.В. Вахрушевой, 2005 г.

Fig. 2. Massive chromite ore of the Burkhoyla area.

Photo by N.V. Vakhrusheva, 2005.

ков и др., 2000); Cr_2O_3 – 42–45 вес. % (Граудинь, Беляевских, 1975). По данным электронно-зондовых анализов (неопубликованные данные авторов), рудный хромшпинелид относится к Fe-Al магнезиохромиту и имеет среднюю эмпирическую формулу $(\text{Mg}_{0.70}\text{Fe}^{2+}_{0.31})_{1.01}(\text{Cr}_{0.99}\text{Al}_{0.93}\text{Fe}^{3+}_{0.06}\text{Ti}_{0.01})_{1.99}\text{O}_4$. На границе с хлоритовым цементом хромшпинелид теряет глинозем и становится более хромистым, т. е. Mg-Al хромитом – $(\text{Fe}^{2+}_{0.61}\text{Mg}_{0.40})_{1.01}(\text{Cr}_{1.41}\text{Al}_{0.33}\text{Fe}^{3+}_{0.22}\text{Ti}_{0.02}\text{V}_{0.01})_{1.99}\text{O}_4$. В цементе хлорит представлен Cr-содержащим клинохлором с эмпирической формулой $(\text{Mg}_{4.67}\text{Fe}_{0.17}\text{Al}_{0.11}\text{Ni}_{0.05})_{5.00}(\text{Al}_{0.83}\text{Cr}_{0.17})_{1.00}[\text{Al}_{1.03}\text{Si}_{2.97}\text{O}_{10}](\text{OH})_8$. Здесь же среди хлорита отмечаются скопления хромсодержащего людвигита. Участками этот борат настолько обогащается хромом, что переходит по составу к своему хромовому аналогу савельеваиту, имеющему упрощенную формулу $(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_2(\text{Cr},\text{Fe}^{3+},\text{Al})\text{O}_2(\text{BO}_3)$ – новому минералу, открытому на этом же объекте в 2021 г. (Pekov et al., 2021). Местами по боратам развивается недоизученный вторичный водный карбонат, предположительно, никелевый аналог стихтита. В хромитовой руде отмечаются единичные зерна диопсида, паргасита и форстерита, а также редкая вкрапленность пентландита со средним составом $(\text{Fe}_{4.52}\text{Ni}_{4.39}\text{Co}_{0.09})_{9.00}\text{S}_{8.00}$ и борнита.

Методы исследования

Химический состав глаукосферита в полированных петрографических шлифах проанализирован в Институте геологии и геохимии УрО РАН (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург) на электронно-зондовом микроанализаторе CAMECA SX 100 с пятью волновыми спектрометрами (аналитик В.А. Булатов) и сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM-6390LV фирмы Jeol с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (аналитик Л.В. Леонова), а также в Лаборатории локальных методов исследования вещества Геологического факультета Московского государственного университета (г. Москва) на электронном микроскопе Jeol JSM-6480LV, оснащенный энергодисперсионным (ЭД) и волновым спектрометрами. Анализы с использованием ЭД-спектрометра выполнялись при следующих условиях: ускоряющее напряжение 20 кВ, сила тока зонда 0.7 нА, диаметр зонда 3 мкм. Анализы с использованием волнового спектрометра выполнялись при 20 кВ и 10 нА. Эталоны: диопсид (Mg), FeAsS (Fe), Cu (Cu), Co (Co), Ni (Ni). Содержания остальных элементов с атомными номерами выше, чем у кислорода, оказались ниже предела обнаружения электронно-зондовым методом.

Рентгенографическое исследование глаукосферита выполнено в ресурсном центре (РЦ) «Рентгенодифракционные методы исследования» Санкт-Петербургского государственного университета (г. Санкт-Петербург). Порошковая рентгенограмма получена на дифрактометре Rigaku R-AXIS Rapid II с цилиндрическим IP детектором (монохроматизированное $\text{CoK}\alpha$ -излучение; геометрия Дебая–Шеррера, $d = 127.4$ мм, экспозиция – 12 мин); интегрирование исходных данных с цилиндрического детектора произведено с помощью программного пакета osc2tab (Бритвин и др., 2017).

Спектры комбинационного рассеяния (КР) карбоната получены в ИГГ УрО РАН на спектрометре LabRAM HR800 Evolution с оптическим микроскопом Olympus BX-FM (аналитик Е.А. Панкрушина). Для возбуждения использовался He-Ne-лазер, длина волны 633 нм. Мощность лазера за объективом – 3.9 мВт. При анализе использовалась дифракционная решетка 1800 штрихов/мм. Диапазон съемки от 0 до 2000 cm^{-1} .

Результаты исследований и их обсуждение

Глаукосферит в кавернах и трещинах хромитовой руды образует тонкие пленки, мелкие изометричные кристаллы и сферолиты размером до 0.3 мм (рис. 3). В редких случаях отмечаются его скопления до 1 мм. Цвет глаукосферита – зеленый до голубовато-зеленого. Он нарастает на все остальные минералы хромитовой руды или покрывает их пленками, т. е. является самым поздним минералом и имеет гипергенное происхождение.

В шлифах глаукосферит просвечивает и имеет светло-зеленую окраску. У сферолитов отмечается зональность (во внешней части), наблюдаемая как под оптическим микроскопом, так и при исследовании методом СЭМ в режиме отраженных электронов (рис. 4а, б). Местами сферолиты глаукосферита обрастают и как бы цементируют обломки других минералов. Кроме того, встречаются индивиды этого карбоната изометричного облика и ромбовидного сечения, которые характеризуются сложной зональностью (рис. 5а, б).

В химическом составе минерала сильно варьируют содержания Cu, Ni и Mg: так, количество NiO колеблется от 14.8 до 25.4 мас. %, CuO – в пределах 28.4–43.8 мас. %, а MgO – от 3.2 до 9.9 мас. %. В кристаллах содержание MgO нарастает от центра к краю (от 6.0 до 9.9 мас. %), а наиболее высокомагнезиальной является кайма, где

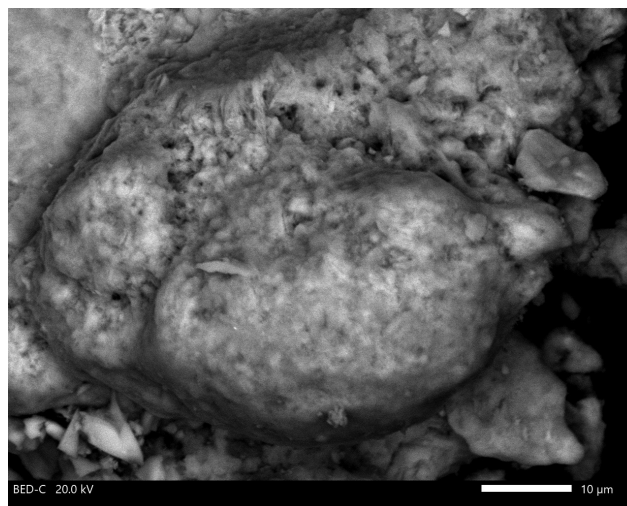


Рис. 3. Сферолиты глаукосферита в каверне хромитита. СЭМ-фото в отраженных электронах.

Fig. 3. Glaukosphaerite spherulites in cavity of chromite. BSE image.

количество MgO достигает 23.0 мас. %. По всей видимости, она сложена макгиннесситом с эмпирической формулой $(Mg_{1.07}Cu_{0.83}Ni_{0.09}Co_{0.01})_{2.00}(CO_3)(OH)_2$. Макгиннессит ранее уже описывался в России в серпентинитах Каганского массива на Южном Урале (Попов, 1993).

В сферолитах количество MgO обычно не превышает 3–5 мас. %, в редких случаях возрастая в краевой части до 8.8 мас. %. В центральной и промежуточной частях сферолитов содержание CuO

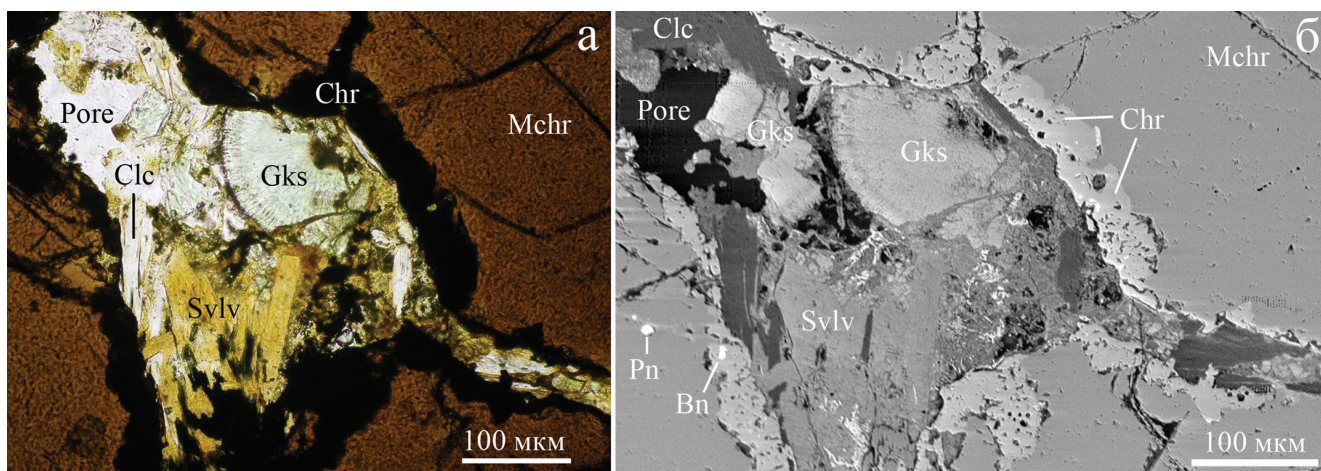


Рис. 4. Полость, инкрустированная поздними минералами, в хромитите Бурхойлинского участка: а – оптический микроскоп, без анализатора; б – СЭМ-фото в режиме отраженных электронов.

Здесь и на рис. 5, Gks – глаукосферит, Chr – хромит, Mchr – магниохромит, Svlv – савельеваит, Clc – клинохлор, Pn – пентландит, Bn – борнит, Pore – открытое пространство полости.

Fig. 4. Cavity with late minerals in chromitite of the Burkhoyla area: а – optical microscope, parallel nicols; б – BSE image.

Here and in Fig. 5, Gks – glaukosphaerite, Chr – chromite, Mchr – magnesiochromite, Svlv – savelievaite, Clc – clinocllore, Pn – pentlandite, Bn – bornite, Pore – cavity.

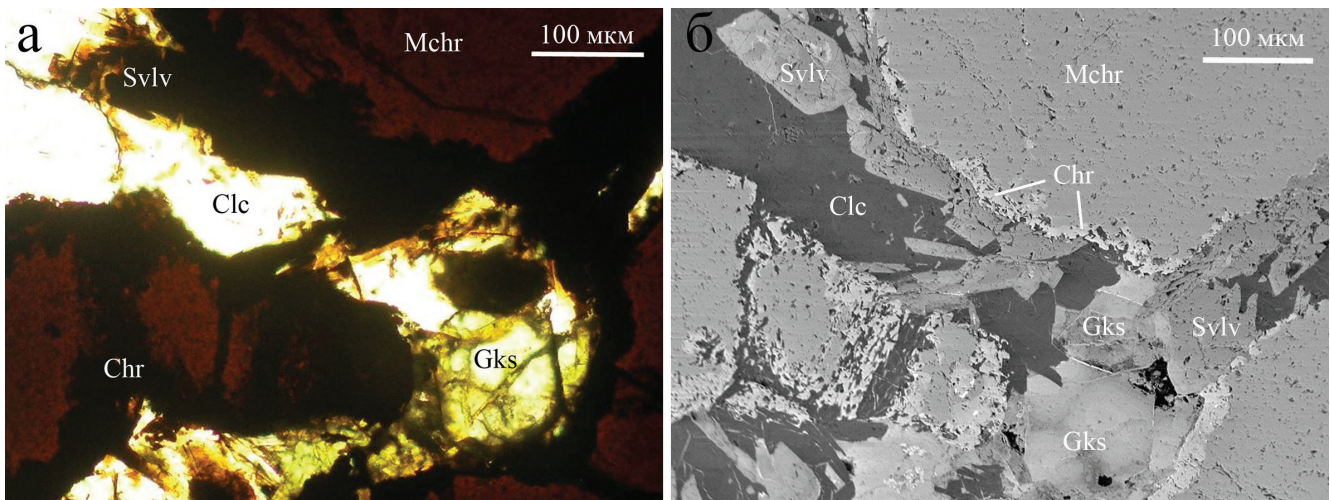


Рис. 5. Прожилок, выполненный поздними минералами, в хромитите Бурхойлинского участка: а – оптический микроскоп, без анализатора; б – СЭМ-фото в режиме отраженных электронов.

Fig. 5. Veinlet of late minerals in chromitite of the Burkhoyla area: а – optical microscope, parallel nicols; б – BSE image.

высокое – 40–43 мас. % при относительно низком количестве NiO – 15–18 мас. %. В краевой части сферолитов количество CuO падает до 31–35 мас. %, а содержание NiO возрастает до 24–26 мас. %. Несмотря на такие значительные вариации состава, все анализы вещества сферолитов укладываются в поле состава глаукосферита.

Представительный состав глаукосферита из краевой части сферолита (мас. %): 25.14 NiO, 0.44 CoO, 0.89 FeO, 34.45 CuO, 7.90 MgO, 21.65 CO₂ (расч.), 8.86 H₂O (расч.), сумма 99.33. Содержания CO₂ и H₂O вычислены по стехиометрии для формулы $Me_2(CO_3)(OH)_2$. Этот состав отвечает эмпирической формуле, рассчитанной на сумму катионов = 2 высокомагнезиального глаукосферита: $(Cu_{0.88}Ni_{0.68}Mg_{0.40}Fe_{0.03}Co_{0.01})_{2.00}(CO_3)(OH)_2$. Если опираться на структурные данные, приведенные в работе (Perchiazzi, Merlino, 2006), и на общие соображения о том, какие примесные катионы, скорее всего, войдут в сильно вытянутый за счет эффекта Яна-Теллера октаэдр $Me1$, преимущественно занятый Cu²⁺, то можно предположить следующее распределение катионов по двум позициям: $Me1(Cu_{0.88}Ni_{0.08}Fe_{0.03}Co_{0.01})$ $Me2(Ni_{0.60}Mg_{0.40})(CO_3)(OH)_2$. Однако пока определено только можно сказать, что вся медь сконцентрирована в позиции $Me1$.

Порошковая рентгенограмма изученного минерала (табл.) отвечает расчетной порошкограмме, базирующейся на структурных данных для глаукосферита (Perchiazzi, Merlino, 2006). Рассчитанные по порошковым данным параметры моноклинной элементарной ячейки изученного образца следую-

щие: $a = 12.070(3)$, $b = 9.363(2)$, $c = 3.131(1)$ Å, $\beta = 98.03(2)^\circ$, $V = 350.3(3)$ Å³, что соответствует структурному типу розазита.

Исследование спектров КР минералов группы розазита и их интерпретация детально представлены в работе (Frost, 2006), данные которой послужили основой для расшифровки полученных нами спектров глаукосферита (рис. 6). В области 100–600 см⁻¹ проявлены колебания, вызванные деформациями связей катионов с гидроксильными группами. Здесь наиболее сильной линией на изученном спектре является 158 см⁻¹, что согласуется с литературными данными. В области деформационных колебаний ν_4 присутствует одна линия – 712 см⁻¹. Деформационные колебания ν_2 при 838 и 928 см⁻¹ проявлены слабо. Полоса 1086 см⁻¹, которая на самом деле состоит из трех узких полос с максимумами при 1097, 1087 и 1065 см⁻¹ (Frost, 2006), соответствует симметричным колебаниям ν_1 (CO₃)²⁻. Линии при 1450 и 1527 см⁻¹ соответствуют несимметричным колебаниям ν_3 (CO₃)²⁻. Таким образом, на полученном КР спектре проявлены моды, типичные для минералов группы розазита и для глаукосферита в частности.

Источником Ni и Cu для глаукосферита, по всей видимости, послужили сульфиды, распыленные по всей матрице хромититов, которые становятся неустойчивыми в коре выветривания. Нами в хромитовой руде Бурхойлинского участка установлены пентландит и борнит, хотя вполне возможно, что здесь присутствует и более разнообразная сульфидная минерализация.

Таблица

Рентгенограмма глаукоферита Бурхойлинского участка

Table

Powder X-ray diffraction data of glaukosphaerite from the Burkhoyla area

| Изученный глаукоферит | | Глаукоферит (Perchiazzi, Merlino, 2006) | | |
|-----------------------|--------------|---|--------------|------------|
| <i>I</i> , % | <i>d</i> , Å | <i>I</i> , % | <i>d</i> , Å | <i>hkl</i> |
| 15 | 7.38 | 12 | 7.37 | 110 |
| 65 | 5.99 | 82 | 5.97 | 200 |
| 54 | 5.04 | 10 | 5.03 | 210 |
| 10 | 4.681 | 2 | 4.682 | 020 |
| 92 | 3.687 | 76 | 3.684 | 220 |
| | | 26 | 3.663 | 310 |
| – | – | 3 | 3.104 | 001 |
| 14 | 3.017 | 8 | 3.020 | 130 |
| 31 | 2.962 | 1 | 2.985 | 400 |
| | | 4 | 2.954 | 11–1 |
| 22 | 2.940 | 16 | 2.947 | 011 |
| | | 23 | 2.928 | –201 |
| 7 | 2.850 | 2 | 2.844 | 410 |
| – | – | 3 | 2.795 | 21–1 |
| 4 | 2.766 | 2 | 2.776 | 111 |
| 100 | 2.599 | 9 | 2.608 | 201 |
| | | 2 | 2.593 | 12–1 |
| | | 100 | 2.588 | 021 |
| – | – | 6 | 2.536 | 33–1 |
| 35 | 2.522 | 32 | 2.517 | 420 |
| – | – | 1 | 2.513 | 211 |
| 36 | 2.485 | 37 | 2.483 | 22–1 |
| 15 | 2.462 | 5 | 2.469 | 121 |
| | | 12 | 2.456 | 330 |
| 7 | 2.341 | 6 | 2.341 | 040 |
| 17 | 2.319 | 9 | 2.321 | 40–1 |
| | | 13 | 2.314 | 510 |
| 13 | 2.299 | 6 | 2.296 | 32–1 |
| – | – | 11 | 2.278 | 221 |
| – | – | 2 | 2.230 | 311 |
| 12 | 2.209 | 5 | 2.202 | 031 |
| 10 | 2.183 | 17 | 2.180 | 240 |
| 33 | 2.134 | 10 | 2.136 | 23–1 |
| | | 14 | 2.128 | 520 |
| 3 | 2.079 | 1 | 2.062 | 321 |
| 11 | 2.013 | 11 | 2.015 | 401 |
| | | 5 | 2.002 | 231 |
| 11 | 1.990 | 18 | 1.990 | 51–1 |
| 5 | 1.952 | 3 | 1.947 | 610 |
| 7 | 1.902 | 16 | 1.897 | 530 |
| – | – | 2 | 1.871 | 14–1 |
| 9 | 1.862 | 5 | 1.869 | 041 |
| | | 13 | 1.850 | 331 |
| – | – | 2 | 1.842 | 440 |
| 4 | 1.834 | 4 | 1.829 | 24–1 |
| 5 | 1.788 | 3 | 1.787 | 250 |
| – | – | 1 | 1.762 | 66–1 |

Примечание. Прочерк – в изученном глаукоферите линия отсутствует.

Note. Dash – intensity is absent in the studied glaukosphaerite.

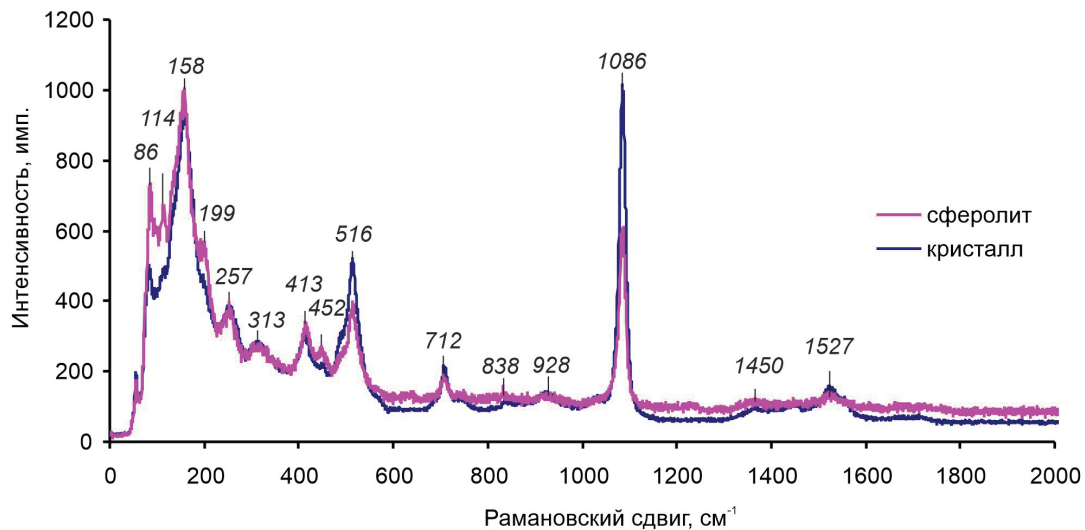


Рис. 6. Спектры КР кристаллов и сферолитов глаукосферита.
Fig. 6. Raman spectra of glaukosphaerite crystals and spherulites.

Выводы

В хромититах Бурхойлинского участка, расположенного в северной части Войкаро-Сыньинского гипербазитового массива (Полярный Урал), обнаружено два водных карбоната группы розазита-малахита – глаукосферит и макгиннесит. Они слагают пленки, мелкие кристаллы и сферолиты зеленого и голубовато-зеленого цвета в кавернах выветрелых хромититов. Находка глаукосферита является первой достоверной для России. Образование этих основных карбонатов связано с гипергенным разложением сульфидов (пентландита и борнита), рассеянных в хромититах.

Авторы благодарны рецензенту за помощь в улучшении статьи. Сотрудники ИГГ УрО РАН выполняли исследования в рамках гранта Российского научного фонда, проект № 22-17-00027, <https://rscf.ru/project/22-17-00027/>. Электронно-зондовые исследования в МГУ проводились на оборудовании, приобретенном в рамках Программы развития МГУ. Рентгеновское изучение минерала осуществлено в рамках выполнения гос. задания АААА-А19-119091190094.

Литература

Бритвин С.Н., Доливо-Добровольский Д.В., Кржижановская М.Г. (2017) Программный пакет для обработки рентгеновских порошковых данных, полученных с цилиндрического детектора дифрактометра Rigaku RAXIS Rapid II. *Записки РМО*, **146**(3), 104–107.

Вахрушева Н.В., Алимов В.Ю. (2014) О локальной изменчивости спектров редкоземельных элементов в хромитоносных ультрамафитах Полярного Урала. *Литосфера*, **14**(1), 41–57.

Граудинь А.Э., Беляевских С.Г. (1975) Результаты поисково-оценочных работ на рудопроявлениях хромитов в пределах северной части Войкаро-Сыньинского гипербазитового массива (Отчет Бурхойлинского поискового отряда по работам 1973–1975 гг.). Воркута, 110 с.

Иванов О.К., Малиновский Ю.А., Можерин Ю.В. (1984) Покровскит $Mg_2(CO_3)(OH)_2 \cdot 0.5H_2O$ – новый минерал из Златогорской расслоенной интрузии. *Записки ВМО*, **113**(1), 90–95.

Ивановский В.С., Овечкин А.М. (1999) Отчет за 1985–1999 г. по объекту: «Поисковые работы на хромиты в северной части Войкаро-Сыньинского гипербазитового массива». Полярный, 325 с.

Никольская Н.Е., Казеннова А.Д., Николаев В.И. (2021) Типоморфизм рудообразующего хромшпинелида месторождений хромовых руд. М., ВИМС, 238 с.

Перевозчиков Б.В., Булыкин Л.Д., Попов И.И., Орфаницкий В.Л., Андреев М.И., Сначев В.И., Даниленко С.А., Черкасов В.Л., Ченцов А.М., Жарикова Л.Н., Клочко А.А. (2000) Реестр хромитопоявлений в альпинотипных ультрабазитах Урала. Пермь, КамНИИКИГС, 474 с.

Попов В.А. (1993) Макгиннесит $(Mg,Cu)_2CO_3(OH)_2$ – первая находка в России. *Уральский минералогический сборник № 2*, 175–176.

Попов В.А., Колисниченко С.В., Блинов И.А. (2013) Никелистая медь и накауриит из Голубой жилы в ультрамафитах (Верхнеуфалейский район, Южный Урал). *Четырнадцатые Всероссийские научные чтения памяти ильменского минералога В.О. Полякова*. Миасс: ИМин УрО РАН, 13–24.

- Савельева Г.Н., Батанова В.Г., Кузьмин Д.В., Соболев А.В.** (2015) Состав минералов мантийных перидотитов как отражение рудообразующих процессов в мантии (на примере офиолитов Войкаро-Сыньинского и Кемпирсайского массивов). *Литология и полезные ископаемые*, **50**(1), 87–98.
- Barbaro A., Kasatkin A.V., Ardit M., Nestola F., Rotiroti N., Škoda R., Agakhanov A.A., Dalconi M.C., Castellaro F.** (2023) Perchiazziite, IMA 2023-013. *European Journal of Mineralogy*, **35**, 397–402.
- Deliens M.** (1975) La glaucosphaerite de Kasompi (Shaba meridional, Zaire). *Bulletin de Minéralogie*, **98**, 175–178.
- Deliens M., Piret P.** (1980) La kolwézite, un hydroxycarbonate de cuivre et de cobalt analogue à la glaukosphaerite et à la rosaite. *Bulletin de Minéralogie*, **103**, 179–184.
- Erd R.C., Cesbron F.P., Goff F.E., Clark J.R.** (1981) Mcguinnessite, a new carbonate from California. *Mineralogical Record*, **12**, 143–147.
- Fehér B., Szakáll S., Zajzon N., Mihály J.** (2015) Parádsasvárite, a new member of the malachite-rosasite group from Parádsasvár, Mátra Mountains, Hungary. *Mineralogy and Petrology*, **109**, 405–411.
- Frost R.L.** (2006) A Raman spectroscopic study of selected minerals of the rosasite group. *Journal of Raman Spectroscopy*, **37**(9), 910–921.
- Lovisato D.** (1908) Rosasite, nuovo minerale della miniera di Rosas (Sulcis, Sardegna). *Atti della Reale Accademia dei Lincei*, **17**, 723–728.
- Matsubara S., Kato A.** (1993) Gaspeite, glaukosphaerite, mcguinnessite and jaborite in serpentinites from Shinshiro City, Aichi Prefecture, Japan. *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, **88**(11), 517–524.
- Nickel E.H., Berry L.G.** (1981) The new mineral nullaginite and additional data on the related minerals rosasite and glaukosphaerite. *Canadian Mineralogist*, **19**, 315–324.
- Pekov I.V., Vakhrusheva N.V., Zubkova N.V., Yapaskurt V.O., Shelukhina Y.S., Erokhin Y.V., Bulakh M.O., Britvin S.N., Pushcharovsky D.Y.** (2021) Savelievaite, IMA 2021-051. *Mineralogical Magazine*, **85**(6), 910–915.
- Pekov I.V., Perchiazzi N., Merlino S., Kalachev V.N., Merlini M., Zadov A.E.** (2007) Chukanovite, Fe₂(CO₃)(OH)₂, a new mineral from the weathered iron meteorite Dronino. *European Journal of Mineralogy*, **19**, 891–898.
- Perchiazzi N.** (2006) Crystal structure determination and Rietveld refinement of rosasite and mcguinnessite. *Zeitschrift für Kristallographie*, **23**, 505–510.
- Perchiazzi N., Merlino S.** (2006) The malachite-rosasite group: crystal structures of glaukosphaerite and pokrovskite. *European Journal of Mineralogy*, **33**, 642.
- Perchiazzi N., Dragone R., Demitri N., Vignola P., Biagioni C.** (2018) Incorporation of Co in the rosasite-malachite carbonate group of minerals: crystal structure studies of kolwezite and synthetic cobaltoan malachites. *European Journal of Mineralogy*, **30**, 609–620.
- Pryce M.W., Just J.** (1974) Glaukosphaerite: A new nickel analogue of rosasite. *Mineralogical Magazine*, **39**(307), 737–743.
- Strunz H.** (1959) Tsumeb, seine Erze und Sekundärminerale, insbesondere der neu aufgeschlossenen zweiten Oxydationszone. *Fortschritte der Mineralogie*, **37**, 87–90.

References

Barbaro A., Kasatkin A.V., Ardit M., Nestola F., Rotiroti N., Škoda R., Agakhanov A.A., Dalconi M.C., Castellaro F. (2023) Perchiazziite, IMA 2023-013. *European Journal of Mineralogy*, **35**, 397–402.

Britvin S.N., Dolivo-Dobrovolsky D.V., Krzhizhanovskaya M.G. (2017) [Software package for processing X-ray powder data from a cylindrical detector of the Rigaku RAXIS Rapid II diffractometer]. *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva [Proceedings of the Russian Mineralogical Society]*, **146**(3), 104–107. (in Russian)

Deliens M. (1975) La glaucosphaerite de Kasompi (Shaba meridional, Zaire). *Bulletin de Minéralogie*, **98**, 175–178. (in French with English abs.)

Deliens M., Piret P. (1980) La kolwézite, un hydroxycarbonate de cuivre et de cobalt analogue à la glaukosphaerite et à la rosaite. *Bulletin de Minéralogie*, **103**, 179–184. (in French with English abs.)

Erd R.C., Cesbron F.P., Goff F.E., Clark J.R. (1981) Mcguinnessite, a new carbonate from California. *Mineralogical Record*, **12**, 143–147.

Fehér B., Szakáll S., Zajzon N., Mihály J. (2015) Parádsasvárite, a new member of the malachite-rosasite group from Parádsasvár, Mátra Mountains, Hungary. *Mineralogy and Petrology*, **109**, 405–411.

Frost R.L. (2006) A Raman spectroscopic study of selected minerals of the rosasite group. *Journal of Raman Spectroscopy*, **37**(9), 910–921.

Graudin A.E., Belyaevskikh S.G. (1975) [Results of prospects and evaluation of chromite occurrences in the northern part of the Voykar-Synya ultramafic massif (an unpublished report of the Burkhoyla prospecting team of 1973–1975)]. Vorkuta, 110 p. (in Russian)

Ivanov O.K., Malinovskii Y.A., Mozherin Y.V. (1984) [Pokrovskite, Mg₂(CO₃)(OH)₂·0.5H₂O, a new mineral from the Zlatogorskaya layered intrusion]. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva [Proceedings of the All-Union Mineralogical Society]*, **113**(1), 90–95. (in Russian)

Ivanovsky V.S., Ovechkin A.M. (1999) [An unpublished report of 1985–1999 «Prospects for chromites in the northern part of the Voykar-Synya ultramafic massif»]. Polyarny, 325 p. (in Russian)

- Lovisato D.** (1908) Rosasite, nuovo minerale della miniera di Rosas (Sulcis, Sardegna). *Atti della Reale Accademia dei Lincei*, **17**, 723–728. (in Italian)
- Matsubara S., Kato A.** (1993) Gaspeite, glaukosphaerite, mcguinnessite and jamborite in serpentinites from Shinshiro City, Aichi Prefecture, Japan. *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, **88**(11), 517–524.
- Nickel E.H., Berry L.G.** (1981) The new mineral nullaginite and additional data on the related minerals rosasite and glaukosphaerite. *Canadian Mineralogist*, **19**, 315–324.
- Nikolskaya N.E., Kazennova A.D., Nikolaev V.I.** (2021) [Typomorphism of ore-forming Cr-spinel from Cr deposits]. M., VIMS, 238 p. (in Russian)
- Pekov I.V., Vakhrusheva N.V., Zubkova N.V., Yapaskurt V.O., Shelukhina Y.S., Erokhin Y.V., Bulakh M.O., Britvin S.N., Pushcharovsky D.Y.** (2021) Savelievaite, IMA 2021-051. *Mineralogical Magazine*, **85**(6), 910–915.
- Pekov I.V., Perchiazzi N., Merlino S., Kalachev V.N., Merlino M., Zadov A.E.** (2007) Chukanovite, $\text{Fe}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$, a new mineral from the weathered iron meteorite Dronino. *European Journal of Mineralogy*, **19**, 891–898.
- Perchiazzi N.** (2006) Crystal structure determination and Rietveld refinement of rosasite and mcguinnessite. *Zeitschrift für Kristallographie*, **23**, 505–510.
- Perchiazzi N., Merlino S.** (2006) The malachite-rosasite group: crystal structures of glaukosphaerite and pokrovskite. *European Journal of Mineralogy*, **33**, 642.
- Perchiazzi N., Dragone R., Demitri N., Vignola P., Biagioni C.** (2018) Incorporation of Co in the rosasite-malachite carbonate group of minerals: crystal structure studies of kolwezite and synthetic cobaltoan malachites. *European Journal of Mineralogy*, **30**, 609–620.
- Perevozchikov B.V., Bulykin L.D., Popov I.I., Orfanitsky V.L., Andreev M.I., Snachev V.I., Danilenko S.A., Cherkasov V.L., Chentsov A.M., Zharikova L.N., Klochko A.A.** (2000) [Catalogue of chromite occurrences in Alpine-type ultramafic rocks of the Urals]. Perm, KamNIKIGS, 474 p. (in Russian)
- Popov V.A.** (1993) Mcguinnessite $(\text{Mg,Cu})_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ – the first find in Russia. *Ural'skiy mineralogicheskiy sbornik № 2 [Urals Mineralogical Collection no. 2]*, 175–176. (in Russian)
- Popov V.A., Kolisnichenko S.V., Blinov I.A.** (2013) [Nickeliferous native copper and nakauriite from the Golubaya (Blue) vein in ultramafites (Verkhniy Ufaley district, South Urals)]. *Chetyrnadtsatyye Vserossiyskiye nauchnyye chteniya pamyati il'menskogo mineraloga V.O. Polyakova [Fourteenth All-Russian Scientific Meeting in Memory of the Ilmeny Mineralogist V.O. Polyakov]*. Miass: IMin UrO RAN, 13–24. (in Russian)
- Pryce M.W., Just J.** (1974) Glaukosphaerite: A new nickel analogue of rosasite. *Mineralogical Magazine*, **39**(307), 737–743.
- Savelieva G.N., Batanova V.G., Kuzmin D.V., Sobolev A.V.** (2015) Composition of minerals in mantle peridotites as proxy of ore-forming processes in the mantle: evidence from ophiolites in the Voykar-Synya and Kempirsai massifs. *Lithology and Mineral Resources*, **50**(1), 80–91.
- Strunz H.** (1959) Tsumeb, seine Erze und Sekundärminerale, insbesondere der neu aufgeschlossenen zweiten Oxydationszone. *Fortschritte der Mineralogie*, **37**, 87–90. (in German with English abs.)
- Vakhrusheva N.V., Alimov V.Yu.** (2014) [REE local spectral variability in chromite-bearing ultramafic rocks of the Polar Urals]. *Litosfera [Lithosphere]*, **14**(1), 41–57. (in Russian)