

УДК 549.0 (470.55)

DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-2-3

НОВЫЕ ДАННЫЕ О МИНЕРАЛОГИИ СУГУРСКОГО МЕДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ЮЖНОМ УРАЛЕ

В.А. Попов, М.А. Рассомахин, В.И. Попова

*Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, Институт минералогии,
г. Миасс Челябинская обл., 456317 Россия; popov@mineralogy.ru*

Статья поступила в редакцию 28.01.2022 г., принята к печати 19.04.2022 г.

NEW DATA ON MINERALOGY OF THE SUGUR COPPER DEPOSIT, SOUTH URALS

V.A. Popov, M.A. Rassomakhin, V.I. Popova

*South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,
Institute of Mineralogy, Miass, Chelyabinsk oblast, 456317 Russia; popov@mineralogy.ru*

Received 28.01.2022, accepted 19.04.2022

Аннотация. Обобщены ранние и приведены новые данные о минералах и минеральных парагенезисах Сугурского месторождения меди в Сугурских горах на Южном Урале. Руды месторождения характеризуются широким развитием кальцита, андрадита, диопсида, магнетита, хромита и серпентина совместно с пиритом, халькопиритом, халькозином, пирротинном, миллеритом и редким бадделеитом. Генезис месторождения ранее рассматривался и как контактово-метасоматический, и как гидротермальный. Новые данные позволяют отнести медную минерализацию к скарново-карбонатитовой системе, проявленной в Карабашском ультрамафитовом массиве.

Ключевые слова: Сугурское месторождение, скарны, карбонатиты, серпентиниты, медная минерализация.

Abstract. The previous and new data on minerals and mineral assemblages of the Sugur copper deposit in the Sugur Mountains of South Urals are summarized. The ores of the deposit host abundant calcite, andradite, diopside, magnetite, chromite and serpentine together with pyrite, chalcopyrite, chalcocite, pyrrhotite, millerite, and rare baddeleyite. The genesis of the deposit was previously considered both contact-metasomatic and hydrothermal. The new data allow us to attribute the copper mineralization to a skarn-carbonatite system, which is locally recognized in the Karabash ultramafic massif.

Keywords: Sugur deposit, skarns, carbonatites, serpentinites, copper mineralization.

Для цитирования: Попов В.А., Рассомахин М.А., Попова В.И. Новые данные о минералогии Сугурского медного месторождения на Южном Урале *Минералогия*, **8**(2), 23–36. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-2-3

For citation: Popov V.A., Rassomakhin M.A., Popova V.I. New data on mineralogy of the Sugur copper deposit, South Urals. *Mineralogy*, **8**(2), 23–36. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-2-3.

Введение

Сугурское месторождение медных руд известно с 1823 г. и находится на северо-западном склоне Сугурских гор на южной окраине г. Карабаш на Южном Урале (рис. 1). Карабашские медные проявления, приуроченные к контакту известняков

с серпентинитами Соймоновской долины, были известны задолго до находки колчеданных месторождений в зеленосланцевой толще. В геологическом очерке месторождений медных руд на Урале А.Н. Заварицкий (1927) отмечал, что Сугурское месторождение вызывает несомненно большой теоретический интерес. Шахта Сугурская по распоряже-

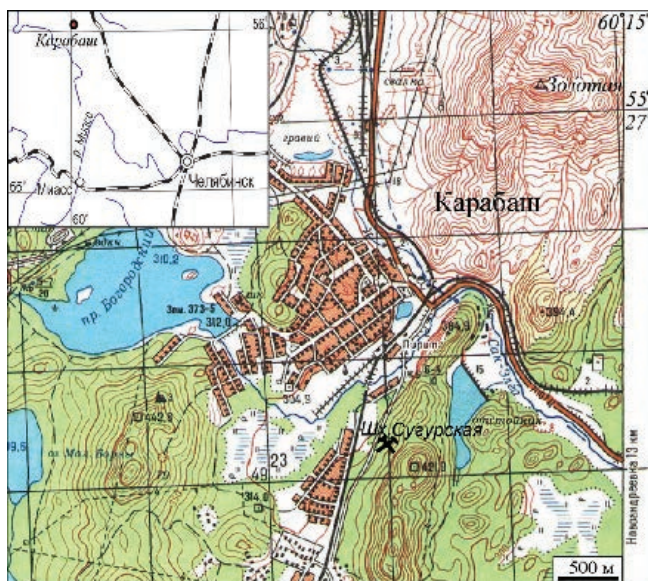


Рис. 1. Географическое положение Сугурской шахты в южной части города Карабаш.

Fig. 1. Geographical location of the Sugur mine in the southern part of the town of Karabash.

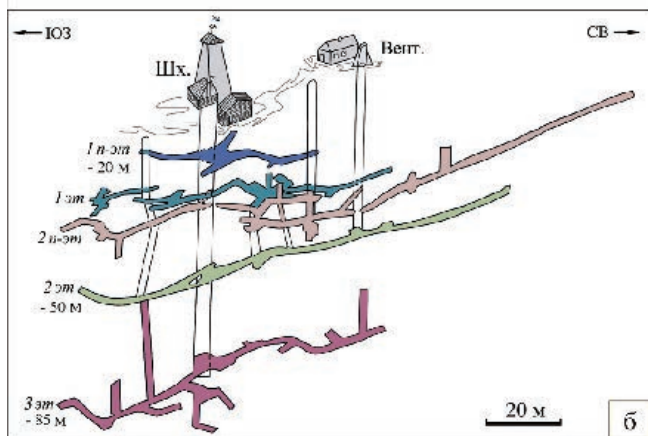


Рис. 2. Сугурская шахта с постройками 1938 г. (а) и схема подземных горных выработок (б) по (Малий, 1940ф).

Fig. 2. Sugur mine with buildings in 1938 (a) and scheme of the underground mines (б) after (Maliy, 1940ф).

нию заводчика Л.И. Расторгуева была пройдена в 1837 г. до глубины 50 м с рассечками на горизонтах 20, 32, 42 и 57 м от устья шахты. Отрабатывались окисленные медные руды с малахитом и самородной медью; в 1840 г. шахта была затоплена (Малий, 1940ф). В 1907 г. шахта откачивалась Кыштымским горным обществом. В 1911–1912 гг. месторождение находилось в английской концессии, шахта была углублена до 87 м, но руды признаны невыгодными, и шахту затопили. Полученные геологические данные (Stikney, 1915) кратко приведены А.Н. Заварицким (1927).

В 1938 г. Южно-Карабашским рудоуправлением Сугурская шахта была откачана и восстановлена (рис. 2). В районе шахты пробурено семь скважин до глубины до 85 м. В 1939–1940 гг. была разбурена геофизическая аномалия к северу от шахты 13-ю скважинами глубиной до 285 м. В 1941 г. дальнейшая отработка месторождения признана экономически нецелесообразной. Отвалы горных пород района шахты экскурсионно посещались специалистами и любителями камня, но в открытую печать никакие сведения не поступали. В 2021 г. нами частично обследованы отвалы Сугурской шахты с отбором минералогической коллекции для дополнительных исследований горных пород и руд. Образцы коллекции изучены оптическими методами, часть образцов обработана слабой соляной кислотой. Охарактеризованы морфология и взаимоотношения минералов; фотографии образцов выполнены В.А. Поповым. СЭМ фото и химический состав минералов получены М.А. Рассомахиным на сканирующем электронном микроскопе СЭМ VEGA3 TESCAN SBU с ЭДА Oxford Instruments X-act.

Геология рудного поля

Сугурское месторождение приурочено к контакту крупного массива ультрамафитов с известняками вдоль западного подножия Сугурских гор (рис. 3), получившего название Сугурский контакт (Малий, 1940ф). В районе месторождения известняки достигают видимой мощности до 150–170 м; простирание восточного контакта известняков с серпентинитами 10–15° с изгибами, особенно южнее шахты. Падение контакта юго-восточное под углом 60–70°, но встречается и пологое падение контакта на запад. В западном контакте известняков с зеленокаменной толщей отмечено небольшое тело серпентинитов мощностью 2–50 м. В 70–80 м к востоку от Сугурской шахты в серпентинитах при-

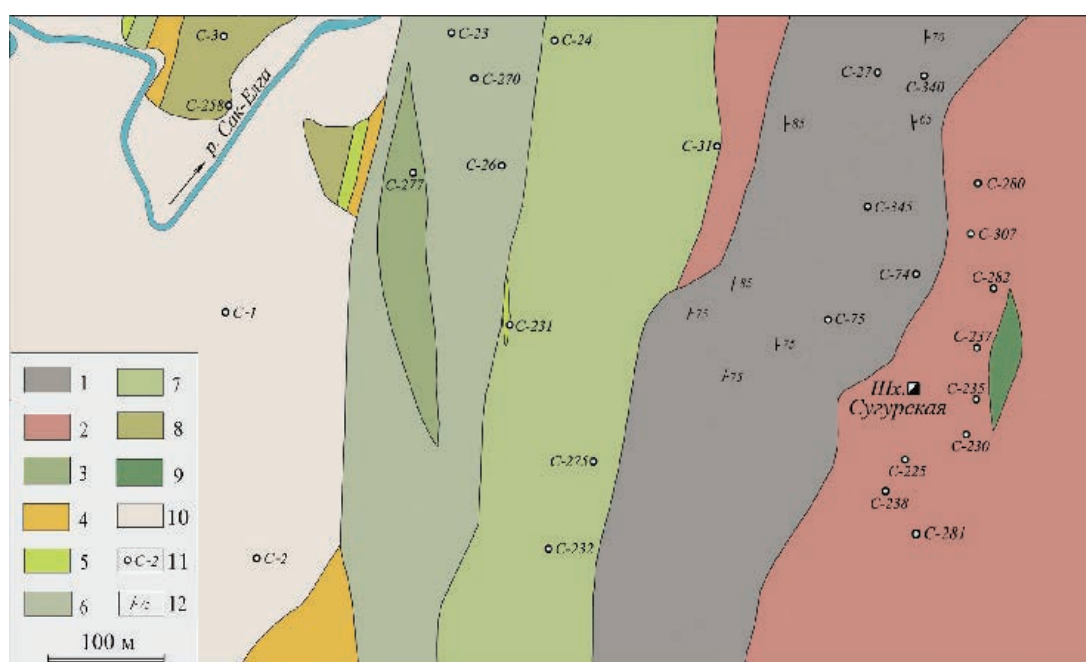


Рис. 3. Геологическая схема района Сугурского месторождения, с упрощениями и дополнениями по (Малий, 1940ф).

1 – известняки; 2 – серпентиниты; 3 – порфировиды; 4–8 – сланцы: кварцево-серицитовые (4), кварц-хлорит-серицитовые (5), кварц-серицит-хлоритовые (6), кварц-хлоритовые (7) и кварц-хлорит-эпидотовые (8); 9 – диориты, 10 – четвертичные отложения; 11 – номера скважин; 12 – элементы залегания.

Fig. 3. Geological scheme of the Sugur deposit, modified after (Maliy, 1940f).

1 – limestone; 2 – serpentine; 3 – porphyritic rocks; 4–8 – schist: quartz-sericite (4), quartz-chlorite-sericite (5), quartz-sericite-chlorite (6), quartz-chlorite (7), quartz-chlorite-epidote (8); 9 – diorite; 10 – Quaternary sediments; 11 – borehole numbers; 12 – bedding elements.

существуют тела жильных диоритов мощностью до 20 м и протяженностью 120 м. Тальк-карбонатные породы развиты по Сугурскому контакту южнее шахты, а также и в северной части месторождения.

В южной части месторождения в скважине № 281 на глубине 135 м на контакте с известняками выявлены гранит-порфиры с жильными телами скарнов с обильной вкрапленностью пирита и халькопирита (рис. 4). Сульфидная минерализация развита вдоль всего контакта серпентинитов с известняками.

Петрографическая характеристика пород месторождения

Петрографическое описание пород района месторождения проводилось в первой четверти XX века А.Н. Заварицким (1927), а в 1940 году – геологом Н.З. Эдельманом (Малий, 1940ф). Их данные дополнены нашими наблюдениями.

Серпентиниты – плотные темно-зеленые, темно-серые и светло-зеленые породы, обычно сильно

рассланцованные и состоящие, в основном, из агрегатов антигорита с редкими зернами талька, кальцита, магнетита, хромита и хлорита. Серпентиниты мелкозернистые, таблитчато-зернистые, мелкие зерна магнетита в серпентините образуют параллельные или извилистые цепочки (рис. 5а, б).

По расположению магнетита и серпентина в псевдоморфозах можно предположить в некоторых первичных породах бастиновые псевдоморфозы по энстатиту (рис. 5а, в) либо оливину (рис. 5б). Распространены прожилки и сложные по форме тела с параллельно-шестоватыми агрегатами серпентина (хризотила), образовавшиеся при пластических деформациях породы в процессе серпентинизации (рис. 6), а также плотные микрозернистые (афанитовые) серпофиты. В некоторых серпентинитах присутствуют крупные зерна хромита, нередко замещенные частично или полностью магнетитом (рис. 7).

В полостях трещин параллельно формировались прожилки заполнения «альпийского типа» с аналогичной минерализацией. В серпентинитах

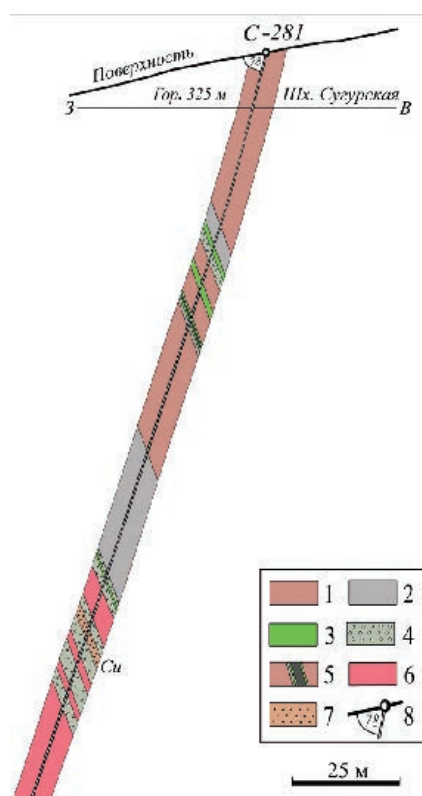


Рис. 4. Геологический разрез по документации скважины № 281 (Малий, 1940ф).

1 – серпентиниты; 2 – карбонатные породы; 3 – эпидот-хлоритовые сланцы; 4 – скарны; 5 – серный колчедан; 6 – гранит-порфиры; 7 – густая вкрапленность сульфидов; 8 – угол наклона скважины.

Fig. 4. Geological section according to borehole no. 281 (Maliy, 1940ф).

1 – serpentinite; 2 – carbonate rocks; 3 – epidote-chlorite schist; 4 – skarn; 5 – massive sulfides; 6 – porphyry granite; 7 – sulfide dissemination; 8 – angle of inclination of the borehole.

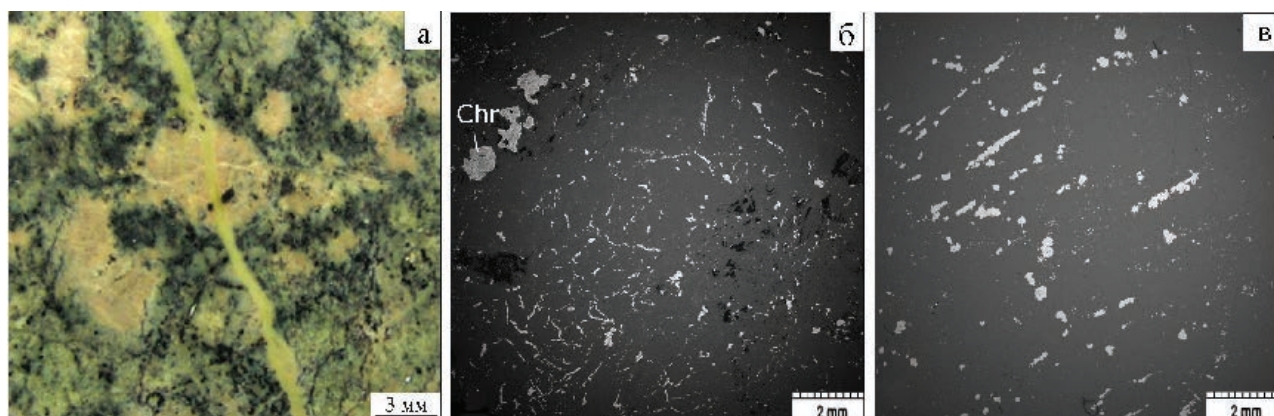


Рис. 5. Серпентинит с псевдоморфозами хризотила по энстатиту с прожилками офита (а); метакристаллы магнетита (белое) в серпентинизированном дуните с хромитом (Chr) (б); метакристаллы магнетита (белое) по спайности серпентинизированного энстатита (бастита) (в).

Рис. а – макрофото; б, в – СЭМ изображения.

Fig. 5. Serpentine with pseudomorphous chrysotile after enstatite with ophite veinlets (a); magnetite metacrystals (white) in serpentinitized dunite with chromite (Chr) (b); magnetite metacrystals (white) along cleavage of serpentinitized enstatite (bastite) (c).

Fig. a – macroscopic image; б, в – SEM image.

эти жилки малозаметны, а в карбонатных породах (карбонатитах?) видны четко (рис. 7).

Известняки белого и светло-серого цвета, средне- и мелкокристаллические, иногда рассланцованные, преимущественно состоят из кальцита. В отдельных шлифах отмечались мелкие зерна кварца, таблочки хлорита, серпентина и серицита,

развитые вдоль трещин деформации. Палеофауна в карбонатных породах Сугурского месторождения не отмечалась, но известна в долине р. Сак-Елга на удалении десятков метров западнее контакта с магматическими телами, где ранее находили нижнедевонские кораллы Favosites (Малий, 1940ф).

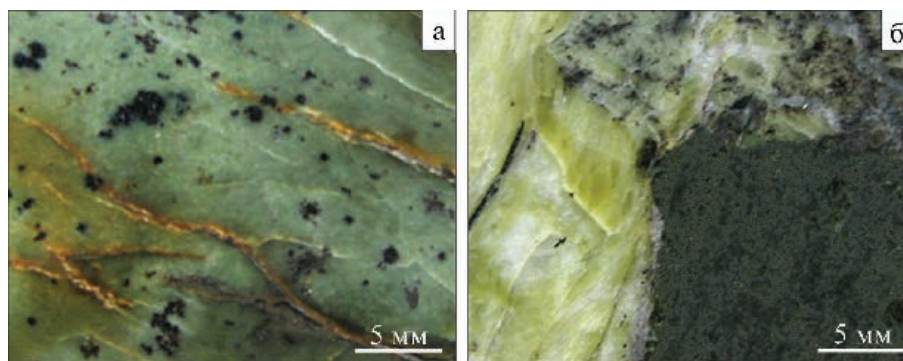


Рис. 6. Серпентинит с хромитом, частично замещенным магнетитом (а); хризотил-асбест (желто-зеленый) с кальцитом в полости деформационного отслоения среди серпентинита (б).

Fig. 6. Serpentine with chromite partly replaced by magnetite (a); chrysotile-asbestos (yellow-green) with calcite in cavities of serpentine (б).

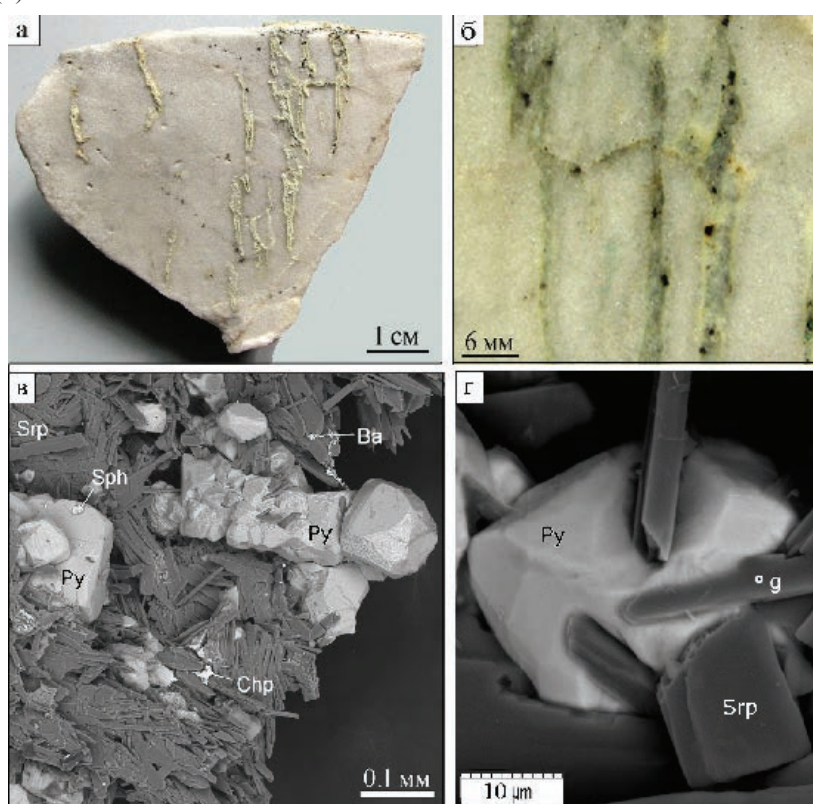


Рис. 7. Кальцитовые карбонатиты с сульфидно-кальцит-серпентиновыми (а, б) и кальцит-пирит-сфалерит-антигоритовыми прожилками с халькопиритом и баритом (в); г – пирит (Py) с вростками антигорита (Srp).

Кальцит растворен в HCl. Рис. а, б – макрофото; в, г – СЭМ изображения. Sph – сфалерит, Ba – барит, Chp – халькопирит.

Fig. 7. Calcite carbonatite with sulfide-calcite-serpentine (а, б) and calcite-pyrite-sphalerite-antigorite veinlets with chalcopyrite and baryte (в); г – pyrite (Py) with antigorite (Srp) ingrowths.

Calcite is dissolved in HCl. Fig. а, б – macroscopic images; в, г – SEM images. Sph – sphalerite, Ba – baryte, Chp – chalcopyrite.

Тальк-карбонатная порода светло-серого цвета, плотная, в некоторых образцах – с заметной сланцеватой текстурой и включениями серпентина и хромита на контактах с серпентинитом. Минеральный состав породы – тальк, магнезит, антигорит, хлорит, магнетит и гематит. С.П. Малий

(1940ф) отмечал листвениты – кварц-карбонатные породы с зеленой слюдой (зоны лиственитизации известны и ССВ Сугурского месторождения).

Плагноклазовый порфирит содержит порфировые включения плагноклаза, замещенного клиноцоизитом; основная масса в породе преобра-

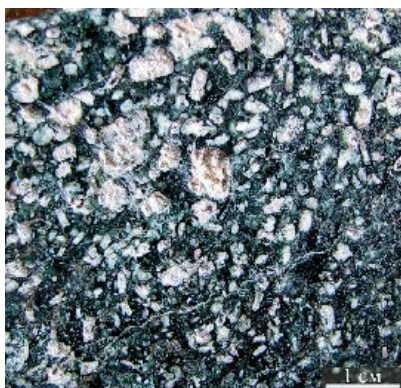


Рис. 8. Зеленокаменно-измененный плагиоклазовый порфирит.

Fig. 8. Altered plagioclase porphyrite.

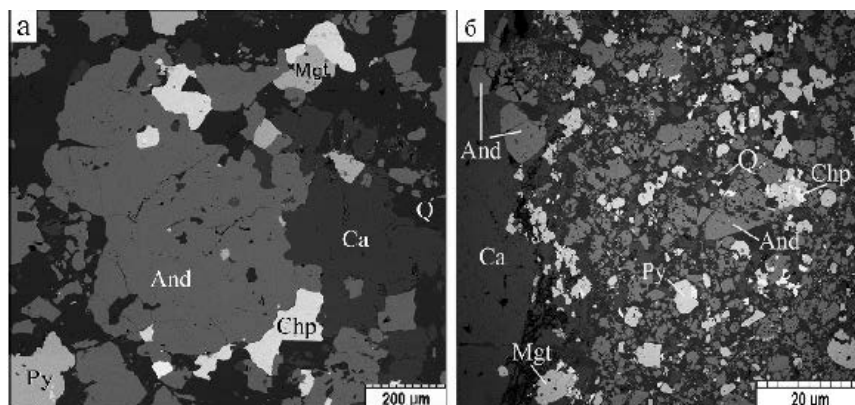


Рис. 9. Скарны неравнозернистой структуры (а, б) с признаками сокристаллизации андрадита (And) с кальцитом (Ca), кварцем (Q), халькопиритом (Chp), пиритом (Py) и магнетитом (Mgt).

Здесь и на рис. 13–20, СЭМ изображения.

Fig. 9. Skarns of inequigranular structure (a, б) with cocrystallized andradite (And), calcite (Ca), quartz (Q), chalcopyrite (Chp), pyrite (Py), and magnetite (Mgt).

Here and in Figs. 13–20, SEM images.

зована в агрегат клиноцоизита с хлоритом и титанитом (рис. 8). В порфирите из отвала шахты нами встречены редкие мелкие зерна циркона и барита.

Гранит-порфир – массивная полнокристаллическая светлая порода с крупными вкрапленниками кварца, калиевого полевого шпата, альбита, амфибола, клиноцоизита и редкого карбоната. В гранит-порфире встречались участки скарнирования.

Скарны Сугурского месторождения – плотные пятнистые кристаллические породы желтовато-зеленого цвета с агрегатами зеленоватого эпидота, ярко-зеленого граната (андрадита) и вкрапленностью рудных минералов. По минеральному составу выделялись скарны кальцит-гранатовые с диопсидом и антигоритом, кальцит-эпидот-гранатовые, кварц-гранатовый и кальцит-цоизит-эпидотовый (Малий, 1940ф). По нашим наблюдениям, можно выделить фации скарнов: относительно однородную, состоящую из силикатов с кальцитом («первично-магматическую») со структурами эвтектической кристаллизации (рис. 9) и неоднородную метасоматическую с развитием более поздних минералов вдоль зон трещиноватости с реликтами ранних пород.

В скарнах в ряде зональных зерен андрадита нами встречены включения кальцита и антигорита. Местами среди кальцита выявлены относительно крупные кристаллы андрадита. Минеральный состав кальцит-эпидот-гранатового скарна (при пересчете химического анализа с учетом оптических данных) (мас. %): гроссуляр 44, серпентин 15, ан-

драдит 13, кальцит 10, эпидот 4, цоизит 4, пирит 5, титанит 1, апатит 0.1 (Малий, 1940ф).

Некоторые скарны содержат значительное количество сульфидов и кварца (рис. 10а) и образуют зональные жильные тела, похожие на мелкие дайки. Для таких тел характерны четкие контакты, отсутствие признаков метасоматического развития, наличие индукционных поверхностей между всеми минералами в результате эвтектической кристаллизации (рис. 10б).

Карбонатиты – выделяемые нами на месторождении существенно карбонатные (силикатно-окисно-карбонатные) породы, образовавшиеся при раскристаллизации расплава-раствора и нередко внешне сходные с минерализованными известняками и мраморами (в рамках ранее принятых моделей). В крупных глыбах из отвалов Сугурского месторождения выявлено, что измененные вмещающие породы рассечены жилообразными телами карбонатитов с содержанием кальцита более 50 % их объема. По минеральному составу карбонатиты подразделены на магнетит-кальцитовые, магнетит-андрадит-кальцитовые, пирит-магнетит-кальцитовые и магнетит-серпентин-кальцитовые мраморовидные (рис. 11). Характерными сопутствующими минералами карбонатитов, образующими парагенезисы с голубоватым кальцитом, являются магнетит, гранат, серпентин, пирит и хромит, реже – миллерит, уранинит и бадделейт.

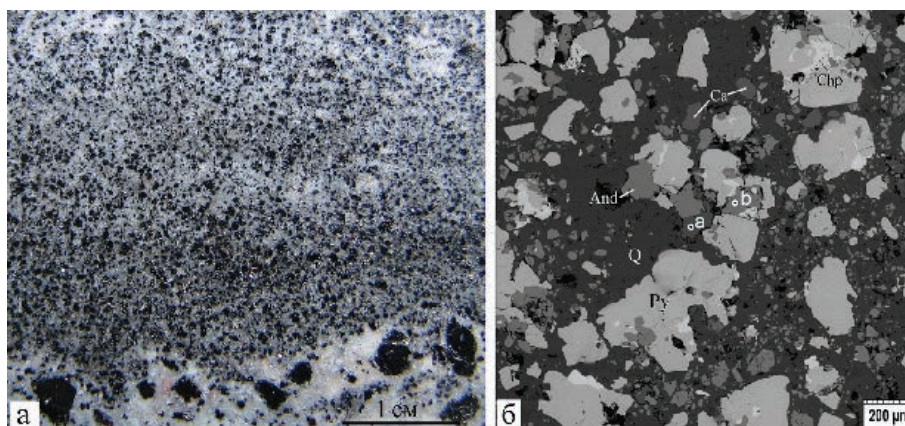


Рис. 10. Мелкозернистый скарн (а) и его структура (б) с пиритом (Py), кварцем (Q), кальцитом (Ca), халькопиритом (Chp) и андрадитом (And).

Рис. а – макрофото; б – СЭМ изображение.

Fig. 10. Fine-grained skarn (a) and its structure (б) with pyrite (Py), quartz (Q), calcite (Ca), chalcopyrite (Chp), and andradite (And).

Fig. a – macroscopic image; б – SEM image.

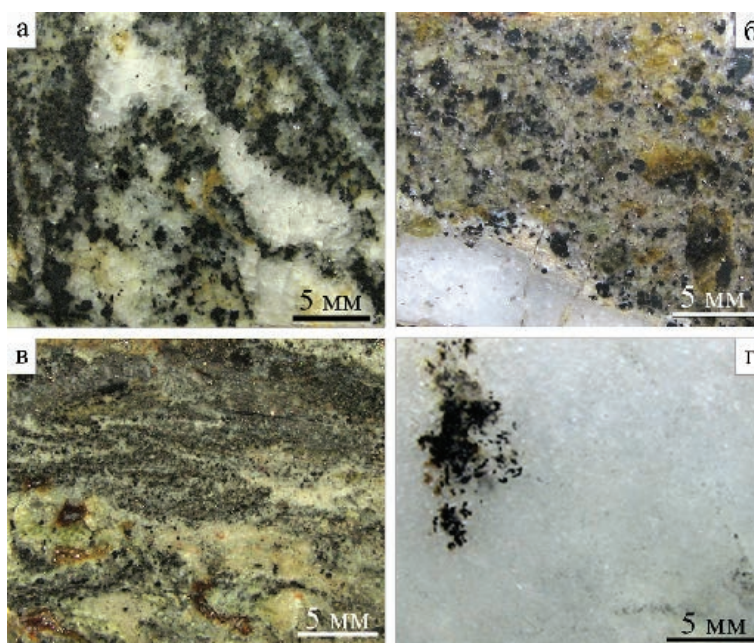


Рис. 11. Разновидности карбонатитов Сугурского месторождения:

а – магнетит-кальцитовый; б – магнетит-андрадит-кальцитовый; в – пирит-магнетит-кальцитовый; г – магнетит-серпентин-кальцитовый мраморовидный.

Fig. 11. Carbonatite types of the Sugur deposit:

а – magnetite-calcite; б – magnetite-andradite-calcite; в – pyrite-magnetite-calcite; г – marble-like magnetite-serpentine-calcite.

Гранатовая «сыпучка» – красно-коричневая пористая тяжелая порода в коре выветривания (рис. 12), состоящая из андрадита, лимонита, гипса и кварца. Такие скопления граната возникли вследствие растворения кальцита с образованием лимонита в участках закарстования карбонатитов

при окислении сульфидов андрадит-кальцитового карбонатита.

Тектоническая структура с телами карбонатитов и скарнов заполнения полостей протягивается на 8 км к северу в породах Карабашского ультрамафитового массива. Часть мелких карбонатитовых

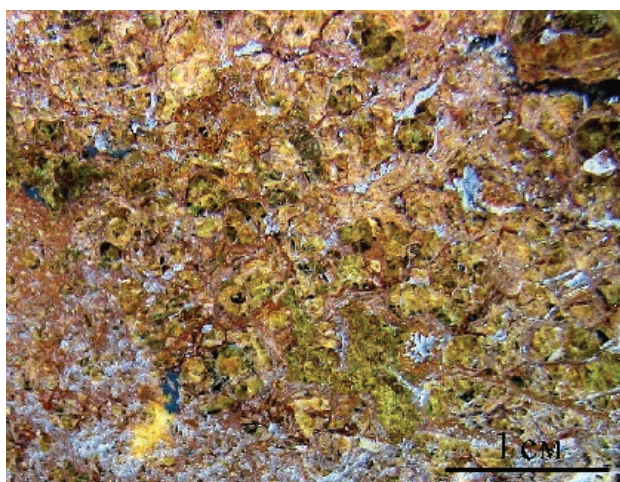


Рис. 12. Гранатовая «сыпучка»: андрадит (светло-зеленое) в пористом лимоните (желто-коричневое) с кварцем и гипсом в полостях (светло-серое).

Fig. 12. Garnet «sand»: andradite (light green) in porous limonite (yellow-brown) with quartz and gypsum in cavities (light gray).

тел содержит самородное золото в сростаниях с редкометалльными и редкоземельными минералами (Попов, 2017).

Характеристика породообразующих минералов

Гранаты – преобладающие минералы скарнов с размером зерен от долей до 2–4 мм, реже до 8 мм. Изученные нами гранаты по составу соответствуют **андрадиту** $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$, который содержит примеси (мас. %): Al_2O_3 до 1.71, MnO до 0.37, MgO до 0.31, иногда Cr_2O_3 до 0.1. На кристаллах присутствуют участки граней форм {110}, {211} и {110 + 211}. Гроссуляр, предполагавшийся по пересчету химического анализа скарна (Малий, 1940ф), нами не встречен.

Диопсид $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ в виде крупных белых кристаллов и агрегатов выявлен в скарнах и карбонатитах. Состав диопсида из парагенезиса с андрадитом характеризуется формулой $(\text{Ca}_{1.01}\text{Mg}_{0.92}\text{Fe}_{0.05}\text{Mn}_{0.01}\text{Al}_{0.01})_{2.00}(\text{Si}_{2.00}\text{O}_{6.00})$.

Минералы группы серпентина представлены преобладающим **антигоритом** $\text{Mg}_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ и **хризотилом** $\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$, которые широко распространены не только в серпентинитах, но и в карбонатитах, скарнах и жилах «альпийского» типа. Антигорит образует разные парагенезисы (рис. 8). Минерал содержит примесь FeO (0.68–2.14 мас. %). При микронзондовых исследованиях встречен **гринна-**

лит с содержанием, FeO 45.19 и NiO 7.0 мас. %; эмпирическая формула $(\text{Fe}_{2.73}\text{Ni}_{0.40}\text{Mg}_{0.04}\text{Ca}_{0.02})_{3.19}[(\text{Si}_{1.91}\text{Al}_{0.04})_{1.95}\text{O}_{5.00}](\text{OH})_{4.00}$.

Эпидот $\text{Ca}_2(\text{Al}_2\text{Fe})(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$ – распространенный минерал скарнов, ранее по оптическим данным в шлифах указывались также **клиноцоизит** и **цоизит** (Малий, 1940ф). В наших образцах не встречен.

Кварц SiO_2 в ассоциации с гранатом, пиритом и другими минералами отмечен в скарнах, но чаще встречаются поздние кварцевые прожилки.

Клинохлор $\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3)_{4.0}\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ в парагенезисе с кальцитом, магнетитом и апатитом- (F,OH) является характерным минералом скарнов и карбонатитов. Клинохлор железистый и характеризуется формулой $(\text{Mg}_{4.48}\text{Fe}_{0.62}\text{Al}_{0.87}\text{Ca}_{0.03})_{6.00}(\text{Al}_{0.89}\text{Si}_{3.11})_{\Sigma 4.00}\text{O}_{10.00}(\text{OH})_{8.00}$. Более железистый клинохлор $(\text{Mg}_{3.53}\text{Fe}_{1.03}\text{Mn}_{0.07}\text{Al}_{1.37})_{6.00}(\text{Al}_{1.24}\text{Si}_{2.76})_{\Sigma 4.00}\text{O}_{10.00}(\text{OH})_8$ выявлен в дайке измененного диорита, а низкожелезистый хромсодержащий клинохлор с формулой $(\text{Mg}_{4.73}\text{AlCr}_{0.14}\text{Fe}_{0.10}\text{Ca}_{0.03})_{6.00}(\text{Al}_{1.11}\text{Si}_{2.89})_{\Sigma 4.00}\text{O}_{10.00}(\text{OH})_{8.00}$ – в хромитсодержащих серпентинитах.

Кальцит CaCO_3 – распространенный минерал скарнов и карбонатитов, имеющий вид среднезернистых и мелкозернистых агрегатов. Кальцит нередко образует агрегаты с гранатом, клинохлором, кварцем и сульфидами. В составе кальцита определены примеси MgO 0.44 мас. % и FeO 0.32 мас. %.

Магнетит MgCO_3 упоминался в тальк-карбонатных породах (Малий, 1940ф); в наших образцах не встречен.

Тальк $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ развит в тальк-карбонатных породах в северной и южной периферических частях месторождения (Малий, 1940ф); примеси в тальке не выявлены.

Титанит CaTiSiO_5 указан в кальцит-гранатовом скарне (Малий, 1940ф); нами встречен в измененной дайке диорита, где состав его с малыми примесями Al и V характеризуется эмпирической формулой $\text{Ca}(\text{Ti}_{0.87}\text{Al}_{0.10}\text{V}_{0.03})\text{SiO}_{5.00}$.

Минеральный состав руд месторождения

Вмещающие породы месторождения (серпентиниты, тальк-карбонатные породы, известняки) вблизи рудных скарнов слабо изменены. Висячий и лежащий контакты рудных тел выделяются довольно резко. По трещинам отдельности в карбонатных породах проявлено оталькование, серпентинизация и развитие сульфидов на значительном удалении от контакта.

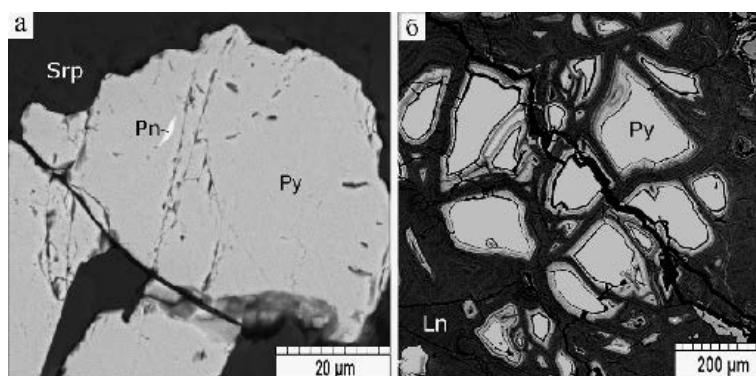


Рис. 13. Кобальтистый пирит (Py) с вростком пентландита (Pn) в серпентините (а) и зональные псевдоморфозы лимонита (Ln) по пириту (Py) (б).

Fig. 13. Co-bearing pyrite (Py) with pentlandite inclusion (Pn) in serpentine (a) and zoned pseudomorphic limonite (Ln) after pyrite (b).

Руды месторождения представляют собой жильные скарновые породы и некоторые минеральные типы карбонатитов с вкрапленностью рудных минералов с широко варьирующими соотношениями рудных и нерудных минералов. Список минералов руд включает: рудные – гематит, золото, магнетит, миллерит, молибденит, пентландит, пирит (и «мельниковит-пирит»), пирротин, сфалерит, халькопирит, хромит («хромистый железняк»); нерудные («петрогенные») – андрадит, апатит, гипс, барит, диопсид, кальцит, кварц, эпидот, клиноцоизит, серпентины, тальк, титанит, хлорит, хризотил-асбест, цоизит; гипергенные – азурит, борнит, ковеллин, куприт, лимонит, магнезит, малахит, медь самородная, халькозин, эритрин (Малий, 1940ф). Нами дополнительно выявлены ангидрит, бадделлит, гриналит, йодаргирит, магнезиохромит, уранинит, циркон и Fe-Ni As-содержащий сульфид.

Пирит FeS_2 – основной рудный минерал, широко распространенный в ассоциации с магнетитом, халькопиритом, серпентином и другими минералами (рис. 13). Его количество в скарнах и карбонатитах изменяется от первых до 50 об. %. Размер и форма зерен сильно варьируют. На индивидах преобладают индукционные поверхности одновременного роста с породообразующими минералами и включениями халькопирита. В зоне окисления по пириту развит лимонит, иногда с опалом (рис. 13б). Пирит содержит примесь Co до 1.2 мас. %

Молибденит MoS_2 указан в керне скважины № 341 в виде тонкозернистого агрегата в полостях трещин отдельности серпентинита (Малий, 1940ф).

Магнетит FeFe_2O_4 – распространенный минерал скарнов и карбонатных пород (Малий, 1940ф).

Количество магнетита в породах варьирует от первых до 20 об. %. Минерал распределен в породе чаще неоднородно в виде пятен. Местами в серпентинитах встречается мелкозернистый магнетит (рис. 14). В магнетите определены следующие примеси (мас. %): MgO (до 2.58), Cr_2O_3 (до 2.49), MnO (до 1.18), CaO (до 0.43), SiO_2 (до 0.38). В карбонатите встречен магнетит с повышенными содержаниями MgO , MnO , Cr_2O_3 и ZnO ; эмпирическая формула его $(\text{Fe}_{0.49}\text{Mg}_{0.25}\text{Mn}_{0.20}\text{Zn}_{0.05}\text{Ca}_{0.01})_{1.0}(\text{Fe}_{1.29}\text{Cr}_{0.66}\text{Al}_{0.05})_{2.00}\text{O}_{4.00}$.

Магнезиохромит MgCr_2O_4 с примесями Fe и Al выявлен в серпентините в виде зерен величиной до 4 мм; эмпирические формулы отвечают магнезиоалюмохромиту $(\text{Mg}_{0.58}\text{Fe}_{0.36}\text{Mn}_{0.06})(\text{Cr}_{1.10}\text{Al}_{0.88}\text{Fe}_{0.01}\text{Si}_{0.01})_{2.00}\text{O}_{4.00}$ и $(\text{Mg}_{0.69}\text{Fe}_{0.31})(\text{Cr}_{1.22}\text{Al}_{0.74}\text{Fe}_{0.04})_{2.00}$. По периферии и трещинам магнезиоалюмохромит замещен магнетитом (рис. 14б, точка d).

Хромит FeCr_2O_4 из апогарцбургитового серпентинита характеризуется изометричной формой зерен и эмпирической формулой $(\text{Fe}_{0.60}\text{Mg}_{0.40})(\text{Cr}_{1.6}\text{Al}_{0.34}\text{Mn}_{0.02}\text{V}_{0.01})_{2.00}\text{O}_{4.00}$ с существенной долей шпинелевого минала. Состав хромита из аподунитового серпентинита отвечает формуле $(\text{Fe}_{0.81}\text{Mg}_{0.16}\text{Zn}_{0.03})(\text{Cr}_{1.04}\text{Fe}_{0.62}\text{Mn}_{0.31}\text{Al}_{0.03})_{2.00}\text{O}_{4.00}$ с повышенным содержанием Mn (рис. 14в, точка h).

Гематит Fe_2O_3 был указан в тальк-карбонатных породах северной части месторождения (Малий, 1940ф). Нами встречен местами в виде микрозернистого агрегата также в гранатовой «сыпучке».

Халькопирит CuFeS_2 – основной гипогенный рудный минерал, где количество его варьирует от долей до 10 об. %, иногда с примесью Au до 0.38 г/т (Малий, 1940ф). По нашим данным, халькопирит

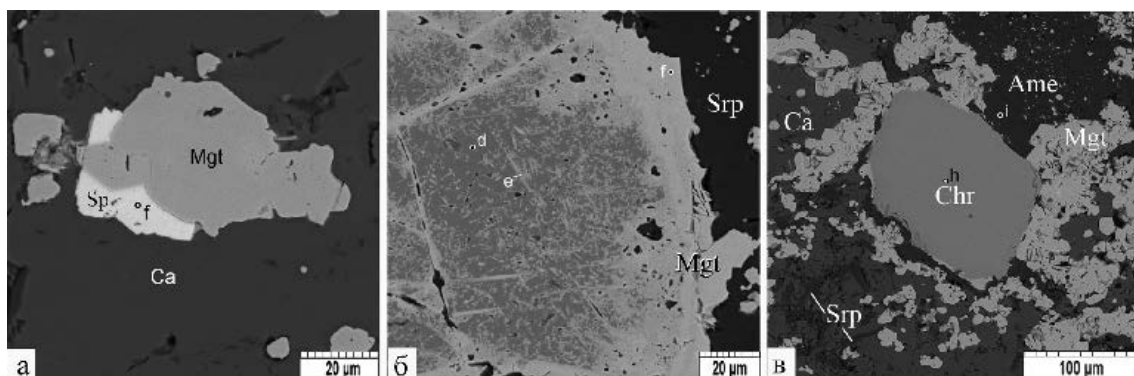


Рис. 14. Сrostок магнетита (Mgt) со сфалеритом (Sp) и кальцитом (Ca) (а); неполная псевдоморфоза магнетита (е, f) по хромиту (d) (б); хромит (Chr) в магнетит-кальцитовом агрегате с серпентином (Srp) и амезитом (Ame) (в).

Fig. 14. Aggregate of magnetite (Mgt), sphalerite (Sp) and calcite (Ca) (a); partial pseudomorphosis of magnetite (e, f) after chromite (d) (б); chromite (Chr) in magnetite-calcite aggregate with serpentine (Srp) and amesite (Ame) (в).

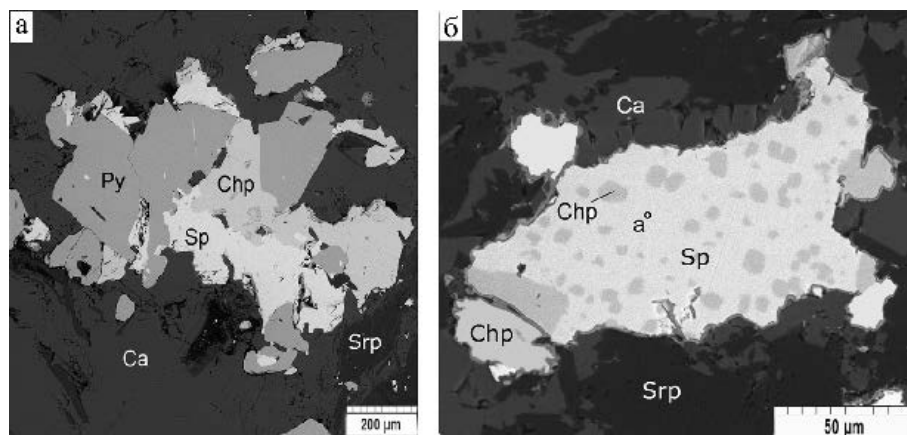


Рис. 15. Парагенезис сфалерита (Sp), халькопирита (Chp) и пирита (Py) с кальцитом (Ca) в серпентинсодержащем карбонатите (а); синтаксическое срастание сфалерита с халькопиритом в карбонатите с серпентином (Srp) (б).

Fig. 15. Assemblage of sphalerite (Sp), chalcopyrite (Chp), and pyrite (Py) with calcite (Ca) in serpentine-bearing carbonatite (a); syntactic intergrowth of sphalerite with chalcopyrite in carbonatite with serpentine (Srp) (б).

образует парагенезисы с пиритом, сфалеритом и кальцитом (рис. 15а), визуально различим в кварце и кальците, а в андрадите и магнетите включения его редки. Встречаются синтаксические срастания халькопирита со сфалеритом (рис. 15б). Химический состав халькопирита практически стехиометричен. В зоне окисления халькопирит частично или полностью замещен халькозином, ковеллином и борнитом.

Сфалерит ZnS встречался как второстепенный минерал (рис. 14а, 15), но иногда его зерна коричневого цвета образуют скопления до нескольких миллиметров. В химическом составе сфалерита выявлены небольшие примеси, мас. %: Fe (до 2–3), Mn (до 0.3) и Cd (до 0.71).

Пирротин $Fe_{1-x}S$ отмечался в скважине № 329 в северном крыле месторождения в тальк-

карбонатной породе в ассоциации с халькопиритом и пиритом (и «мельниковит-пиритом») и в пироксен-гранатовом скарне скважины № 236 (Малий, 1940ф). В образцах из отвалов шахты нами выявлены мелкие (до 2–3 мм) выделения пирротина с пиритом, халькопиритом и миллеритом; в пирротине установлена примесь Co (до 0.42 мас. %) и Ni (до 0.36 мас. %).

Миллерит NiS отмечался в сульфидных прожилках среди серпентинитов из керна скважин №№ 302 и 236 (Малий, 1940ф). Нами мелкие (до 0.5 мм) выделения миллерита встречались относительно часто (рис. 16) с варьирующим составом (мас. %): Ni 59.82–63.92, Fe 4.54–1.45, S 35.21–34.32, сумма 99.59–99.69; эмпирические формулы $Ni_{0.93}Fe_{0.07}S_{1.00}$ и $Ni_{1.01}Fe_{0.02}S_{1.00}$ соответственно.

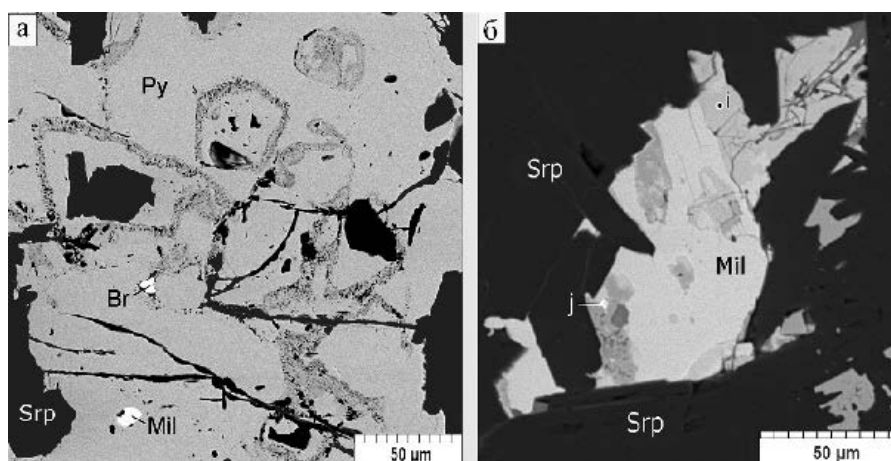


Рис. 16. Включения миллерита (Mil) и барита (Br) в пирите (Py) с зонами микровключений серпентина (Srp) (а); сростание миллерита с пентландитом (i) и Fe-Ni As-содержащим сульфидом (j) (б).

Fig. 16. Inclusions of millerite (Mil) and baryte (Br) in pyrite (Py) with zones of serpentine microinclusions (Srp) (a); aggregate of millerite, pentlandite (i) and Fe-Ni As-bearing sulfide (j) (б).

Пентландит $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$ с переменным содержанием Fe и Ni отмечался в сульфидном прожилке в серпентините из керна скважины № 313 (Малий, 1940ф). Нами пентландит выявлен в пирите (рис. 13а) и в агрегате с миллеритом (рис. 16б, точка i), где видна отдельность пентландита. Состав пентландита (мас. %): Ni 37.11, Fe 18.05, Co 7.90, S 37.01, сумма 100.07; эмпирическая формула $(\text{Ni}_{4.38}\text{Fe}_{2.24}\text{Co}_{0.93}\text{S}_{7.55})_{8.00}$ с некоторым дефицитом катионов (возможно, из-за влияния соседнего миллерита).

As-содержащий Fe-Ni сульфид встречен в виде включения в пентландите (рис. 16, точка j); состав его (мас. %): Ni 18.39, Fe 20.13, Co 1.53, S 29.54, As 28.76, Sb 1.66, сумма 100.01; эмпирическая формула $(\text{Fe}_{0.55}\text{Ni}_{0.48}\text{Co}_{0.04})_{1.06}(\text{S}_{1.40}\text{As}_{0.58}\text{Sb}_{0.02})_{2.00}$.

Бадделеит ZrO_2 выявлен в кальците из карбонатита (рис. 17) в виде длиннопризматического кристаллика (длиной 0.05 мм) вместе с мелкими включениями хромита, миллерита, пентландита и магнетита. В составе бадделеита определены (мас. %): ZrO_2 97.81, HfO_2 0.61, UO_2 0.79, сумма 99.21, эмпирическая формула $\text{Zr}_{0.99}\text{Hf}_{0.01}\text{U}_{0.004}\text{O}_{2.00}$.

Уранинит UO_2 встречен в виде «мечевидного» включения размером 3 мкм в магнетит-кальцитовом карбонатите. Состав (мас. %): UO_2 81.03, ThO_2 6.91, PbO 3.43, CaO 5.17, FeO 0.54, сумма 97.09; эмпирическая формула $(\text{U}_{0.68}\text{Ca}_{0.21}\text{Pb}_{0.03}\text{Th}_{0.06}\text{Fe}_{0.02})\text{O}_{2.00}$.

Фторапатит $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH})$ образует редкие мелкие (до 0.5 мм) включения в минералах карбонатитов и скарнов и характеризуется составом (мас. %): CaO 54.79, P_2O_5 40.90, SiO_2 0.20, F 1.92, $\text{H}_2\text{O}_{\text{расч.}}$ 1.53, сумма 99.49, эмпирическая формула его $\text{Ca}_{5.06}[(\text{P}_{0.99}\text{Si}_{0.01})\text{O}_{4.00}]_{3.00}\text{F}_{0.52}(\text{OH}, \text{O})_{0.48}\text{O}_{12.46}$.

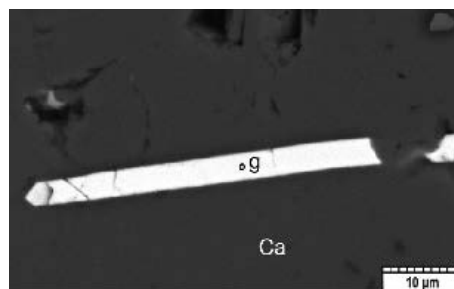


Рис. 17. Бадделеит (g) в кальцитовом карбонатите (Ca).

Fig. 17. Baddeleyite (g) in calcite carbonatite (Ca).

Барит BaSO_4 в виде баритовой «сыпучки» встречается в коре выветривания (Малий, 1940ф) и среди минералов ранних парагенезисов. В составе барита из агрегата с диопсидом и серпентином определены (мас. %): BaO 65.28, SrO 0.68, CaO 0.36, SO_3 33.29, сумма 99.61; эмпирическая формула $\text{Ba}_{1.01}\text{Sr}_{0.02}\text{Ca}_{0.02}(\text{SO}_{4.00})$.

Ангидрит CaSO_4 встречен в виде мелких вростков в пирите из серпентин-кальцитового карбонатита (рис. 18); состав ангидрита (микрозонд, мас. %): CaO 39.8; FeO 0.86; SO_3 57.72; сумма 98.38 с эмпирической формулой $\text{Ca}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}(\text{SO}_{4.00})$.

Гипергенные минералы

Ковеллин CuS в рудах составляет до 0.8 об. % (Малий, 1940ф) и встречался в зоне вторичного сульфидного обогащения как частичная мелкозернистая псевдоморфоза по халькопириту. В кернах глубоких скважин ковеллин не отмечен.

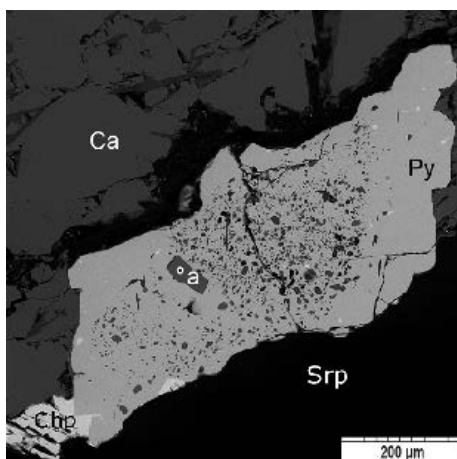


Рис. 18. Ангидрит (а, мелкие включения) и халькопирит (Сру) в пирите (Ру) из серпентин-кальцитового карбонатита (Ca-Srp).

Fig. 18. Anhydrite (a, small inclusions) and chalcocite (Cpy) in pyrite (Py) from serpentine-calcite carbonatite (Ca-Srp).

Халькозин Cu_2S отмечался в меньших количествах, чем ковеллин (Малий, 1940ф) и образован путем замещения халькопирита (рис. 19а). По микронзондовым данным, халькозин характеризуется составом (мас. %): Cu 76.24; Fe 0.56; Ag 0.30; S 22.65; сумма 99.74 с эмпирической формулой $(\text{Cu}_{1.70}\text{Fe}_{0.02}\text{Ag}_{0.01})_{\Sigma 1.73}\text{S}$. Встречены и псевдоморфозы халькозина с малахитом по халькопириту (см. рис. 19б).

Борнит Cu_5FeS_4 встречался реже, чем ковеллин и халькозин (Малий, 1940ф). В псевдоморфозах по халькопириту борнит сопровождался зоной ковеллина.

Гётит (лимонит) широко развит в верхних горизонтах месторождения (Малий, 1940ф) и представлен неоднородными агрегатами с образованием зональных псевдоморфоз по пириту (рис. 13б). В отвалах шахты сейчас встречаются гранатовые «сыпучки» с лимонитовым цементом – микроагрегатом гётита с кварцем и гипсом.

Кварц SiO_2 (вторичный) встречается в трещинах в скалах, но чаще в полостях трещин разных пород и минералов, нередко образуя мелко- и микрозернистые друзы, преимущественно в образцах гранатовой «сыпучки» (рис. 20а).

Гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ отмечался в мелких полостях и трещинах вместе с кварцем в гранатовой «сыпучке» (рис. 20б) и нередко является составной частью цементирующего лимонита.

Малахит $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ встречался в виде небольших почковидных выделений, землистых скоплений и примазок в охристых рудах. В коре выветривания в начале разработок попадались плотные скопления малахита, пригодные для поделок (Малий, 1940ф). По нашим данным, малахит содержит заметную примесь ZnO (1.22 мас. %).

Азурит $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ визуально отмечался в сульфидсодержащих окисленных рудах (Малий, 1940ф). Нами он встречен в виде тонких синих пленок на кальците с малахитом.

Самородная медь Cu встречалась на первом этаже шахты (Малий, 1940ф) в виде древовидных пластинчатых образований.

«**Мельниковит-пирит**» (?) обнаруживался на втором подэтаже в северном крыле шахты в виде

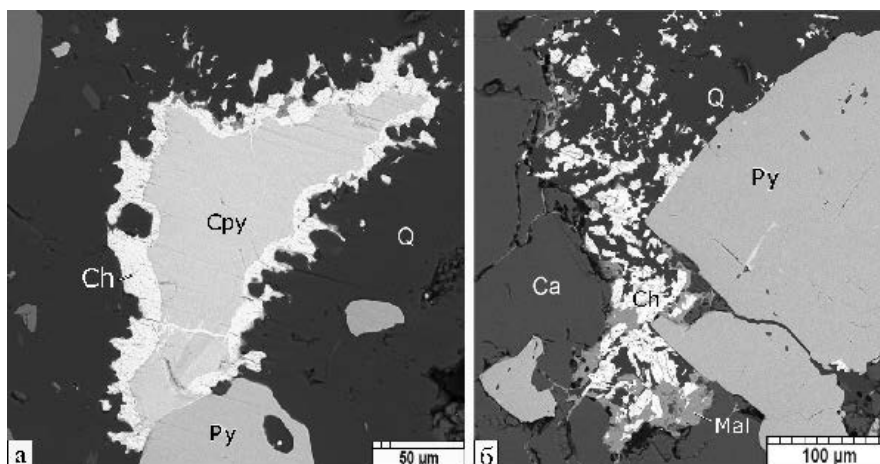


Рис. 19. Частичная псевдоморфоза халькозина (Ch) по халькопириту (Сру) в агрегате с пиритом (Ру) и кварцем (Q) (а); псевдоморфоза халькозина с малахитом (Mal) по халькопириту в пирит-кальцитовом агрегате (Ca) (б).

Fig. 19. Partial pseudomorphosis of chalcocite (Ch) after chalcocite (Cpy) in aggregate of pyrite (Py) and quartz (Q) (a); chalcocite-malachite (Mal) pseudomorphosis after chalcocite (Cpy) in pyrite-calcite aggregate (Ca) (b).

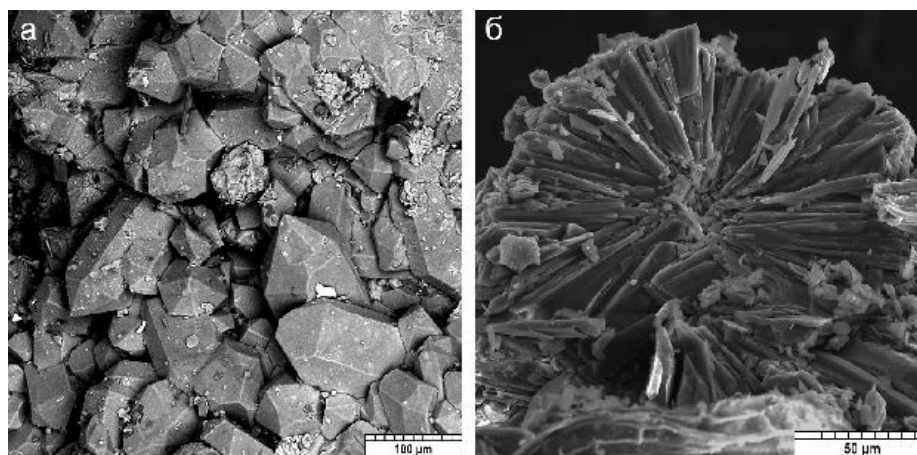


Рис. 20. Минералы из гранатовой «сыпучки»:

а – экзогенный кварц с присыпкой гипса и глины из полости трещины в «сыпучке»; б – сферолит гипса.

Fig. 20. Minerals from garnet «sand»:

a – supergene quartz with gypsum and clay powder; б – spherulitic gypsum aggregate.

рыхлого агрегата черного цвета среди зерен крупнокристаллического пирита (Малий, 1940ф).

Эритрин $\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ отмечался в керне скважины № 328 в виде примазки малиново-розового цвета (Малий, 1940ф).

Йодаргирит AgI встречен нами в лимонитовой массе в виде мелкого включения размером 5 мкм. В ЭД спектре его наиболее сильные пики характерны для серебра и йода и слабые – Fe и Si за счет вмещающего лимонита.

О генезисе месторождения и глубине минерализации

А.Н. Заварицкий (1927) рассматривал Сугурское месторождение как контактово-метасоматическое. В более позднем обзоре геологических данных (Малий, 1940ф) отмечалось, что месторождение следует рассматривать как гидротермальное с высокотемпературной начальной стадией, а выявление дайки гранит-порфира на глубоких горизонтах месторождения позволяет связывать его образование с гранитным магматизмом. Отмечалось, что сравнение химического состава руд Сугурского месторождения с богатыми рудами Тисовского (позднее – Сталинского, в 700 м к З-СЗ) медноколчеданного месторождения, отрабатанного до глубины 600–700 м, может указывать на генетическую общность этих месторождений. Сугурское месторождение небольшое и отрабатано до глубины 85 м. На глубине 285 м скважиной № 341 перебулены кальцит-гранатовые скарны со вкрапленностью

пирита, халькопирита и магнетита, а скважиной № 281 на глубине 120 м в гранит-порфирах – жилы сульфидсодержащих скарнов мощностью до 1.65 м с содержанием меди 1.18 мас. % (Малий, 1940ф).

Рудная минерализация Сугурского месторождения наложена на карбонатные породы, серпентиниты и дайки порфиров, диоритов и гранит-порфиров. Приуроченность медной минерализации не только к метасоматитам, но и к магматическим скарнам и карбонатитам формально допускает контактово-метасоматическую модель А.Н. Заварицкого (1927) с учетом геохимической специализации скарнов и карбонатитов на Cu, Sr, Ni и Co. Зона Сугурского контакта с большим количеством мелких карбонатитовых и скарновых тел продолжается далеко на север в виде трещинной структуры, рассекающей крупный Карабашский ультрамафитовый массив почти по осевой линии (Попов, 2017).

Наши исследования образцов, отобранных из шахтного отвала, частично дополняют данные о минералогии Сугурского месторождения. Онтогенический анализ образцов горных пород и руд показал возможное локальное переплавление пород с образованием скарнов и карбонатитов наряду с карбонатсодержащими метасоматитами. Модель формирования медной минерализации Сугурского месторождения может обрести большее соответствие природе, если считать, что магматические и метасоматические тела вместе с жилами «альпийского типа» составляют единую систему в колонне тепломассопереноса, длительно развивав-

шейся во времени. Возможно, эта система является частью (подсистемой) зоны Главного Уральского разлома.

Заключение

На Сугурском месторождении ранее было известно 36 минералов (Малий, 1940ф), из них 11 доисследованы нами. Нами выявлено и охарактеризовано восемь минералов: ангидрит, бадделеит, гриналит, йодаргирит, магнезиохромит, уранинит, циркон и Fe-Ni As-содержащий сульфид. Исходя из онтогенического подхода при выделении генетических типов горных пород нами предположено наличие магматических скарнов и карбонатитов наряду с метасоматическими их «аналогами» на месторождении. В магматических породах кристаллизация направлена к эвтектическому завершению, т. к. между всеми минералами наблюдаются индукционные поверхности одновременного роста, а для метасоматических пород характерны метакристаллы, псевдоморфозы, «тени» предшествующих структур и текстур. Этот структурный подход в генетических построениях представляется практичным при картировании и создании геологических моделей сложных минеральных тел.

Авторы благодарны И.А. Блинову, А.А. Свиридову и О.Л. Бусловской за содействие в работе. Исследования выполнены по теме № АААА-А21-121012090018-3 «Парагенезисы редких и малоизученных минералов магматических и метаморфических комплексов для оценки минерального многообразия природных объектов».

Литература

Заварицкий А.Н. (1927) Геологический очерк месторождений медных руд на Урале. Часть 1. Колчеданные месторождения на Урале. Л., Издание геологического комитета, 151 с.

Малий С.П. (1940ф) Объяснительная записка к подсчету запасов Сугурского месторождения Южно-Карабашского рудоуправления. Главгеология, трест «Уралцветметразведка», Карабашская геологоразведочная контора, 139 с.

Попов В.А. (2017) О карбонатитах в скарновых объектах Урала. *Литосфера*, **17**(1), 126–134.

Stickney A.W. (1915) The pyrite copper deposits of Kyshtym, Russia. *Economic Geology*, **10**(7), 593–633.

References

Maliy S.P. (1940ф) [Explanatory note to the calculation of reserves of the Sugur deposit of the South Karabash Mining Enterprise]. *Glavgeologiya, trest «Uraltsvetmetrazvedka»*, Karabashskaya geologorazvedochnaya kontora, 139 p. (in Russian).

Popov V.A. (2017) [Carbonatites in skarn objects of the Urals]. *Litosfera [Lithosphere]*, **17**(1), 126–134. (in Russian)

Stickney A.W. (1915) The pyrite copper deposits of Kyshtym, Russia. *Economic Geology*, **10**(7), 593–633.

Zavaritsky A.N. (1927) [Geological sketch of copper deposits in the Urals. Part 1. Massive sulfide deposits of the Urals]. Leningrad, Izдание geologicheskogo komiteta, 151 p. (in Russian).