



УДК 535.435

DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-3

ГЕМАТИТ-КАРБОНАТНЫЕ ПОРОДЫ ЮБИЛЕЙНОГО МЕДНОКОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ): ПРИЗНАКИ АПОСУЛЬФИДНОГО И АПОГИАЛОКЛАСТИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

А.С. Целуйко, Н.Р. Аюпова,

Д.А. Артемьев, М.А. Рассомахин, В.А. Котляров

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

Статья поступила в редакцию 10.11.2024 г., после доработки 28.11.2024 г., принята к печати 16.12.2024 г.

Аннотация. В работе рассмотрены текстурно-структурные особенности гематит-карбонатных пород, ассоциирующих с карбонат-сульфидными обломочными рудами Юбилейного колчеданного месторождения на Южном Урале. В некоторых гематит-карбонатных породах установлены признаки замещения сульфидных рудокластов и гиалокластов гематит-карбонатным материалом, благодаря чему их можно отнести к карбонатным аналогам госсанитов. Для апосульфидных обособлений характерны почковидно-колломорфные, радиально-лучистые, кристаллически-зернистые структуры, унаследованные от рудных обломков, а также включения реликтовых сульфидов и теллуридов. Апосульфидные гематит-карбонатные обособления содержат повышенные концентрации халькофильных (Cu, Zn, Pb, As, Sb, Bi, Te) и литофильных (Ti, Zr, V, W) элементов-примесей. Апогиалокластитовые гематит-карбонатные породы характеризуются наличием обособлений глобулярной структуры с трещинами синерезиса и содержат реликты хлоритовых агрегатов. Цемент гематит-карбонатных пород представлен кальцитом с включениями и гнездами доломита, хлорита, кварца и апатита. Наложенная сульфидная минерализация (метакристаллы пирита, гнезда и прожилки халькопирита и сфалерита) характерна как для апосульфидных, так и для апогиалокластитовых пород.

Ключевые слова: гематит-карбонатные госсаниты, субмаринный гипергенез, гальмиролиз, гиалокласты, сульфиды, теллуриды, ЛА-ИСП-МС, Юбилейное месторождение.

Финансирование. Полевые работы проведены в рамках выполнения госбюджетного задания № 122031600292-6 ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, аналитические работы поддержаны грантом РНФ 22-17-00215.

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность В.В. Масленникову за руководство исследованиями.

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

Вклад авторов. А.С. Целуйко – разработка концепции, исследование, визуализация, написание черновика рукописи, редактирование финального варианта рукописи; Н.Р. Аюпова – разработка концепции, аналитические работы, редактирование финального варианта рукописи; Д.А. Артемьев, М.А. Рассомахин, В.А. Котляров – аналитические/экспериментальные работы.

Для цитирования: Целуйко А.С., Аюпова Н.Р., Артемьев Д.А., Рассомахин М.А., Котляров В.А. Гематит-карбонатные породы Юбилейного медноколчеданного месторождения (Южный Урал): признаки апосульфидного и апогиалокластического происхождения. Минералогия, 2024, 10(4), 60–74. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-3.

HEMATITE-CARBONATE ROCKS OF THE YUBILEYNOE MASSIVE SULFIDE DEPOSIT (SOUTH URALS): EVIDENCE OF REPLACEMENT OF SULFIDE CLASTS AND HYALOCLASTS

A.S. Tseluyko, N.R. Ayupova,

D.A. Artemyev, M.A. Rassomakhin, V.A. Kotlyarov

South Ural Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,
Miass, Chelyabinsk region, 456317 Russia, tseluyko@mineralogy.ru

Received 10.11.2024, revised 28.11.2024, accepted 16.12.2024

Abstract. The article considers textural and structural features of hematite-carbonate rocks associated with carbonate-sulfide clastic ores of the Yubileynoe massive sulfide deposit, South Urals. Some hematite-carbonate rocks exhibit signatures of the replacement of sulfide clasts and hyaloclasts by hematite-carbonate material, classified as carbonate analogs of gossanites. The hematite-carbonate aggregates after sulfide clasts are characterized by inherited reniform-colloform, radial and crystalline-granular structures, as well as the inclusions of relict sulfides and tellurides. The hematite-carbonate aggregates after sulfide clasts contain the elevated concentrations of chalcophile (Cu, Zn, Pb, As, Sb, Bi, Te) and lithophile (Ti, Zr, V, W) trace elements. The hematite-carbonate clasts after hyaloclasts contain aggregates with globular structure and syneresis cracks and contain relics of chlorite. The matrix of hematite-carbonate rocks consists of calcite with inclusions and aggregates of dolomite, chlorite, quartz and apatite. Late sulfide mineralization (pyrite metacrystals, aggregates and veins of chalcopyrite and sphalerite) is characteristic of both hematite-carbonate rocks after sulfide clasts and hyaloclasts.

Keywords: hematite-carbonate gossanites, submarine hypergenesis, halmyrolysis, hyaloclasts, sulfides, tellurides, LA-ICP-MS, Yubileynoe massive sulfide deposit.

Funding. The field works was supported by state project no. 122031600292-6 of South Ural Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS; The analytical work was supported by Russian Scientific Foundation project no. 22-17-00215.

Acknowledgements. We are grateful to V.V. Maslennikov for supervision of our study.

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

Author contribution. A.S. Tseluyko – conceptualization, investigation, visualization, writing – original draft, writing – review & editing; N.R. Ayupova – conceptualization, analytical/experimental works, writing – review & editing; D.A. Artemyev, M.A. Rassomakhin, V.A. Kotlyarov – analytical/experimental works.

For citation: Tseluyko A.S., Ayupova N.R., Artemyev D.A., Rassomakhin M.A., Kotlyarov V.A. Hematite-carbonate rocks of the Yubileynoe massive sulfide deposit (South Urals): evidence of replacement of sulfide clasts and hyaloclasts. *Mineralogy*, 2024, **10**(4), 60–74. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-3

ВВЕДЕНИЕ

Красноцветные гематит-кварцевые и гематит-карбонатно-кварцевые породы широко распространены в рудовмещающих разрезах колчеданных месторождений Урала. Природа красноцветных пород, применительно к различным объектам, объясняется с позиций низкотемпературных гидротермально-метасоматических (Гаврилов, 1972), гидротермально-осадочных (Зайков, 1991; Старикова и др., 2004; Зайков, Анкушева, 2013) и гальмиролитических (Пуркин, Денисова, 1987; Масленников, 1999; Аюпова, Масленников, 2005) моделей. Гальмиролитическая модель предполагает появление железисто-кремнистых пород в процессе донного гальмиролиза колчеданных руд, гиало- и вулканокластитов, исходя из которой красноцветные отложения можно разделить на джаспериты, госсаниты и умбриты (Зайков, 1991; Теленков, Масленников, 1995; Масленников, 1999). Джаспериты – это оранжевые и красные яшмовидные гематит-кварцевые породы, отличающиеся от яшм брекчиевыми текстурами и признаками замещения гиалокластического материала, локализованные в кровле эффузивно-гиалокластитовых построек базальтового или кислого состава, а также на периферии и удален-

ных флангах колчеданных месторождений (Масленников, Аюпова, 2007). К госсанитам отнесены литифицированные алло- и автохтонные продукты субмаринного окисления сульфидных руд, смешанных с фоновыми кремнистыми или известковистыми осадками и залегающие в непосредственной близости от колчеданных залежей (Масленников, Аюпова, 2007). Умбриты – оксидно-железистые отложения с повышенными содержаниями марганца, примесью глинистого, кремнистого или карбонатного материала (Масленников, Аюпова, 2007). Все разновидности железисто-кремнистых пород различаются по текстурно-структурным особенностям, минеральному составу, положению в разрезе и пространственно-возрастными соотношениями с колчеданными рудами.

На Юбилейном медноколчеданном месторождении (Южный Урал) ранее были изучены маломощные слои гематит-карбонатных пород со специфическими текстурно-структурными признаками, ассоциирующие с обломочными сульфидными рудами и содержащие многочисленные микровключения самородного золота, теннантита, теллуридов и урановых минералов (Аюпова и др., 2012; Целуйко и др., 2017; Ayupova et al., 2018; Maslennikov et al., 2019). Однако во многих случа-

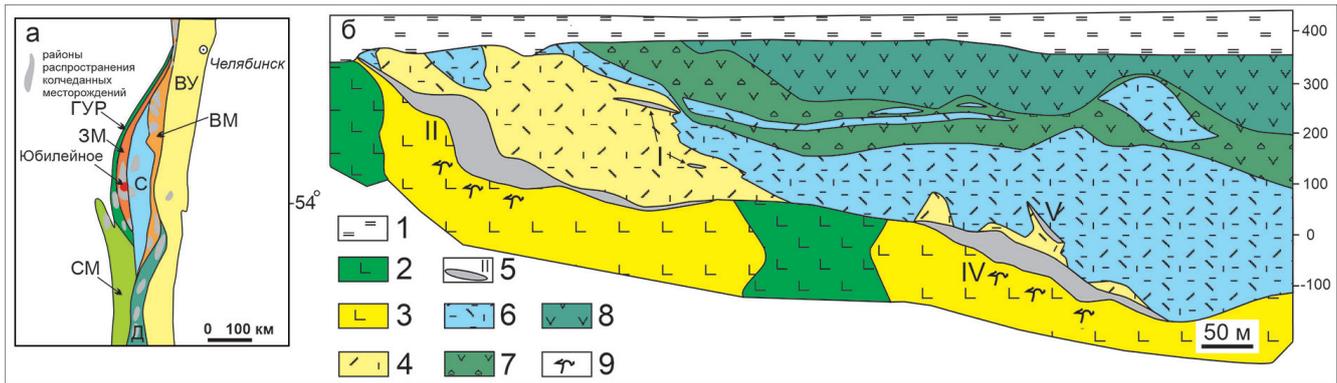


Рис. 1. Позиция Юбилейного месторождения на палеогеодинамической схеме Южного Урала по (Масленников, 1999) (а) и продольный разрез (б) по (Татарко и др., 2011ф).

Рис. 1а: ВУ – Восточно-Уральское поднятие, ВМ – Восточно-Магнитогорская дуга, ЗМ – Западно-Магнитогорская дуга, ГУР – Главный Уральский разлом, С – Сибайский междугорный бассейн, СМ – Сакмарское окраинное море, Д – Домбаровский задугорный бассейн.

Рис. 1б: 1 – рыхлые кайнозойские и юрские отложения; 2 – базальты и бониниты; 3 – серицит-хлорит-кварцевые метасоматиты по основным породам; 4 – серицит-хлорит-кварцевые метасоматиты по кислым породам; 5 – массивные рудные залежи и их номера; 6 – лавы, вулканокластиты и субвулканические тела дацитов и риолитов; 7 – лавы и вулканокластиты андезибазальтов; 8 – андезибазальты; 9 – сульфидный штокверк и вкрапленные руды.

Fig. 1. Position of the Yubileynoe massive sulfide deposit on paleogeodynamic scheme of the South Urals after (Maslennikov, 1999) (a) and schematic longitudinal cross-section of the deposit (b) after unpublished report of (Tatarko et al., 2011).

Fig. 1a: ВУ – East Uralian uplift, ВМ – East Magnitogorsk island arc, ЗМ – West Magnitogorsk island arc, С – Sibay inter-arc basin, СМ – Sakmara marginal sea, Д – Dombrovka back-arc basin.

Fig. 1b: 1 – Cenozoic and Jurassic loose sediments; 2 – basalts and boninites; 3 – sericite-chlorite-quartz metasomatites after mafic rocks; 4 – sericite-chlorite-quartz metasomatites after felsic rocks; 5 – massive ores and their numbers; 6 – lavas, volcanoclastic rocks and subvolcanic bodies of dacites and rhyolites; 7 – lavas and volcanoclastic rocks of basaltic andesites; 8 – basaltic andesites; 9 – sulfide stockwork and disseminated ores.

ях выявление в рассматриваемых породах апосульфидных и апогиалокластитовых гематит-карбонатных обособлений затруднительно в связи с появлением наложенной сульфидной минерализацией и перекристаллизацией карбонатного матрикса. В данной работе рассмотрены текстурно-структурные и минералого-геохимические особенности гематит-карбонатных горизонтов на Юбилейном месторождении.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Юбилейное медноколчеданное месторождение располагается на северо-западе Бурибай-Маканского рудного района, который находится в южной части Западно-Магнитогорского пояса (рис. 1а). Колчеданоносные комплексы пояса сформировались в энзиматической островной дуге верхнеэмско-раннеэфельского возраста (Серавкин и др., 2017; Косарев и др., 2018). Месторождение залегает в позднеэмском бурибайском вулканическом комплексе (D_1e_2br), нижней подсвите баймак-

бурибаевской свиты ($D_1e_2b-br_1$). Основные рудные тела Юбилейного месторождения расположены на границе базальтовой (br_1^2) и кислой (br_1^3) толщ, а относительно мелкие рудные тела – в пределах кислой (br_1^3) толщи (Серавкин, 2013).

Запасы руд на Юбилейном месторождении достигают 107 млн т, меди – 1655 тыс. т, цинка – 1059 тыс. т (Воробьев и др., 1973ф). На месторождении установлено шесть рудных залежей (рис. 1б), в которых преобладают сплошные халькопирит-пиритовые, сфалерит-халькопирит-пиритовые и пиритовые руды, реже отмечаются вкрапленные халькопирит-пиритовые и сфалерит-халькопирит-пиритовые руды (Воробьев и др., 1973ф).

Основные и второстепенные минералы руд представлены пиритом, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, пирротинном и минералами группы блеклых руд, а набор редких минералов варьирует в различных минеральных ассоциациях. Акцессорные минералы в реликтах гидротермальных сульфидных труб представлены самородным золотом, колорадоитом, гесситом и штютцитом (Целуйко и

др., 2019). В обломочных сульфидных отложениях и сульфидсодержащих кремнистых алевропелитах развиты самородное золото, колорадоит, гессит, теллурувисмутит, петцит, алтаит, раклиджит, волинскит, калаверит и штютцит (Целуйко и др., 2019).

Гематит-кварц-карбонатные породы перекрывают халькопирит-пиритовые брекчии и содержат микровключения самородного золота, гессита, кервеллеита, колорадоита, алтаита, теллурувисмутита, уранинита, кобальтина и акантита (Ауурова et al., 2018; Maslennikov et al., 2019). В гематит-кварц-карбонатных породах описаны находки фоссилизированных трубчатых организмов, замещенные Mg-хлоритом и гематит-кварц-карбонатным агрегатом гиалокласты, реликтовые и аутигенные сульфиды (Ауурова et al., 2018).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом для исследования послужили штучные пробы гематит-карбонатных пород, контактирующие и перекрывающие обломочные медноцинково-колчеданные руды Второй рудной залежи.

Оптическое изучение карбонатных пород в полированных и прозрачных петрографических шлифах проводилось на микроскопе Olympus BX-51 с использованием фотокамеры Olympus DP12. Химический состав большей части минералов проанализирован на сканирующем электронном микроскопе VEGA3 Tescan (аналитик М.А. Рассомахин, ЮУ ФНЦ Миг УрО РАН, г. Миасс) с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments X-act, ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 0.3 нА, для количественного анализа использованы эталоны MINM-25-53 фирм «ASTIMEX Scientific Limited», (стандарт № 01-044) и «Microanalysis Consultants Ltd.» (стандарт № 1362). Воспроизводимость определений составляет от 1 до 15 отн. %. Предел обнаружения химических элементов не превышают 0.2 мас. %. Часть анализов минералов выполнена на растровом электронном микроскопе РЭММА-202М (аналитик В.А. Котляров, ЮУ ФНЦ Миг УрО РАН, г. Миасс), снабженного рентгеновским энергодисперсионным спектрометром LZ-5 и Si Li детектором с разрешением 140 эВ. При проведении количественного анализа применялось ускоряющее напряжение 20 или 30 кВ при токе зонда от 4 до 6 нА. При этом использовались стандарты чистых металлов (Micro-Analysis Consultantws Lt, Ltd, X-Ray Microprobe Standards, Registered Stsndard

Number 1362) или синтетических (природных) минералов (Astimex Scietific Limited, MINM25-53, Mineral Mount Serial № 01-044) с энергодисперсионными анализаторами.

Элементы-примеси в гематит-карбонатных агрегатах определены методом ЛА-ИСП-МС на масс-спектрометре Agilent 7700х, оборудованном приставкой для лазерной абляции New Wave Research UP-213 (аналитик Д.А. Артемьев). Настройки масс-спектрометра: длина волны лазера – 213 нм, мощность высокочастотного сигнала – 1450 Вт; газ носитель – Ar; скорость потока – 0.90–0.95 л/мин; расход плазмообразующего газа (Ar) – 15 л/мин; расход вспомогательного газа (He) – 0.90 л/мин. Диаметр пучка при работе с гематит-карбонатными агрегатами составлял 80 мкм. Для удаления поверхностных загрязнений перед каждым анализом выполнялась предварительная абляция продолжительностью 3 сек. В течение первых 30 сек. с регистрировался холостой сигнал без абляции вещества, затем в течение последующих 60 сек. обрабатывался сигнал от аблированного материала. Между анализами проводилась продувка газом в течение 45–90 сек. Калибровка масс-спектрометра осуществлялась по карбонатному (MACS-3) и сульфидному (MASS-1) стандартам. Расчет химического анализа проводился в программном комплексе Iolite.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Макро- и микроскопические особенности гематит-карбонатных пород. По составу и количественным соотношениям обломочной составляющей выделены несколько разновидностей гематит-карбонатных пород: 1) гематит-карбонатные, 2) гематит-карбонатные с хлоритизированными гиалокластами и 3) гематит-хлорит-карбонатные с обломками хлоритизированных гиалокластов и сульфидной минерализацией.

Гематит-карбонатные породы полосчатого облика состоят из красных тонко-мелкозернистых гематит-кальцитовых агрегатов, рассеянных прожилками светло-серого кальцита и практически не содержат обломки гиалокластов (рис. 2а). Порода имеет слоистую текстуру, в отдельных слоях – пятнистую благодаря появлению пятен наложенного серовато-белого карбоната. Основная масса гематит-карбонатных пород сложена кальцитом с тонкодисперсной вкрапленностью гематита. В составе кальцита отмечаются незначительные примеси

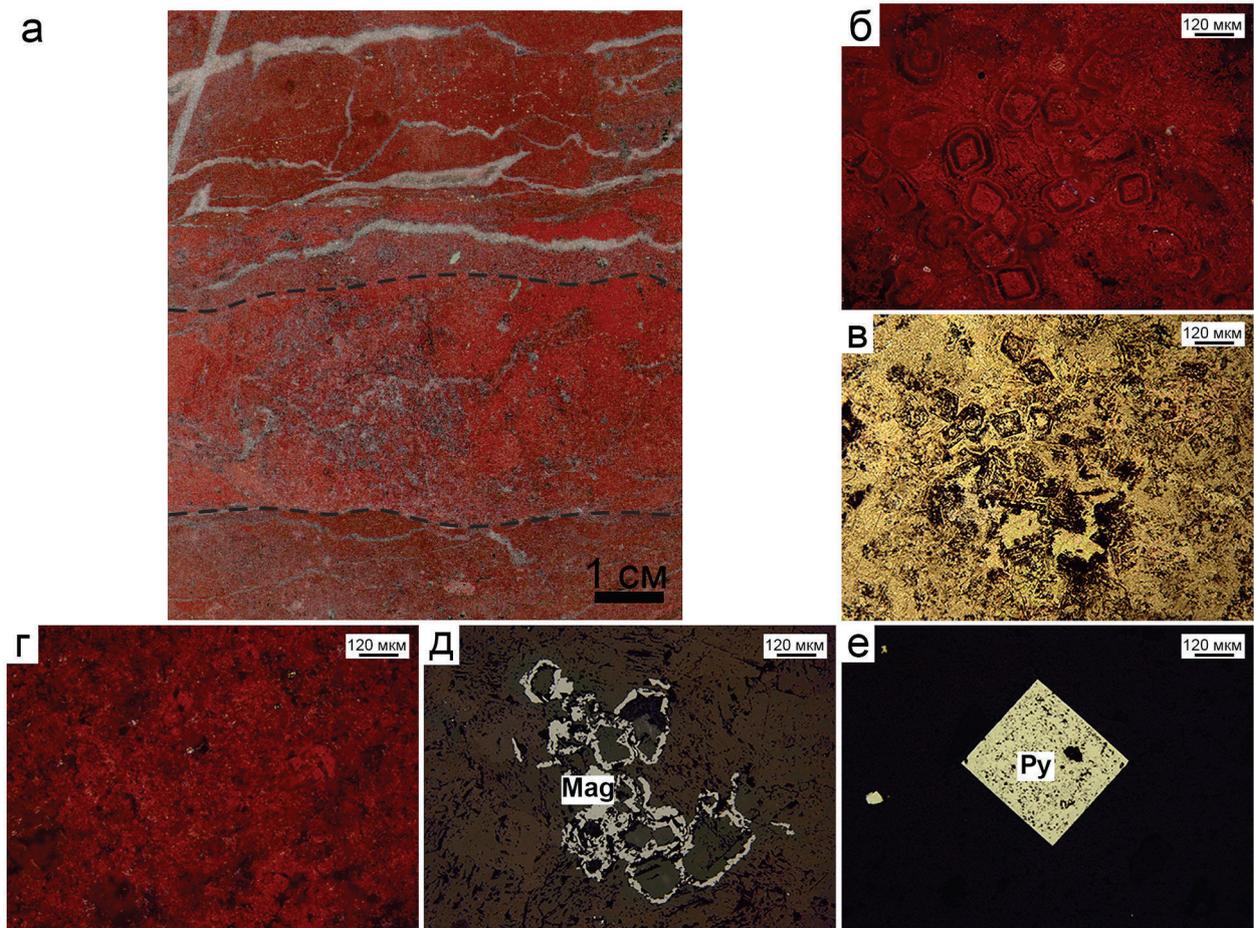


Рис. 2. Гематит-карбонатная порода: а – внешний вид слоистой гематит-карбонатной породы с прожилками светло-серого кальцита (пунктирной линией оконтурены границы слоев); б, в – ромбовидные кристаллы кальцита, содержащие зональную тонкодисперсную вкрапленность гематита; г – пятнистая текстура гематит-карбонатной породы; д – атоллоидные агрегаты магнетита (Mag), окаймляющие зерна кальцита; е – пористый метакристалл пирита (Py) в гематит-карбонатной породе.

Фото а – полированный образец, б, г–е – отраженный свет (б–г – темнопольное изображение), в – проходящий свет без анализатора.

Fig. 2. Hematite-carbonate rock: а – layered hematite-carbonate rock with numerous veins of light gray calcite (the dotted line outlines the layers); б, в – rhombic calcite crystals with zoned finely dispersed hematite inclusions; г – spotted texture of rock; д – atoll-shaped magnetite aggregates (Mag) around calcite grains; е – porous pyrite metacrystal (Py) in hematite-carbonate rock.

Image а – polished sample, б, г–е – reflected light (б–г – dark-field images), в – thin section without analyzer.

(мас. %): MgO (до 0.5), MnO (до 0.4) и FeO (до 0.9) (электронное приложение, лист 1). Кальцит образует зернистые агрегаты, сложенные ромбовидными кристаллами размером до 0.1–0.2 мм. В ростовых зонах кристаллов кальцита чередуются зоны с тончайшей вкрапленностью гематита и без нее (рис. 2б, в). Местами гематит-кальцитовые агрегаты характеризуются пятнистой, микробрекчиевой и прожилковой микротекстурами (рис. 2г).

В гематит-кальцитовых агрегатах распространены микровключения доломита, кварца, апатита, хлорита, редко оксидов урана, пирита, сфалерита,

халькопирита, галенита, пирротина и магнетита. Магнетит образует кристаллы, сростки сложной морфологии и атоллоидные агрегаты, окаймляющие кристаллы кальцита (рис. 2д). Ксеноморфные зерна магнетита часто присутствуют в более поздних прожилках белого кальцита. Пирит развит в виде вкрапленности гип- и идиоморфных кристаллов и их сростков размером от долей до 1–2 мм, содержащих пористые ядра с многочисленными включениями нерудных минералов и гематита (рис. 2е).

Гематит-карбонатные породы с хлоритизированными гиалокластами перекрывают обломочные колчеданные руды, сцементированные светло-серым карбонатным материалом (рис. 3а). Основная масса породы состоит из кальцитовых агрегатов, окрашенных в серовато-белые, ярко-красные, светло-оранжевые цвета, отражающих неравномерное распределение тонкодисперсного гематита и формирующих однородные, местами пятнистые мелко-тонкозернистые агрегаты (рис. 3б). Хлоритизированные гиалокласты (размером до 1 см) в одних случаях имеют угловатую, сглаженно-угловатую, вытянутую форму и слабо корродированы гематит-карбонатным агрегатом. В других случаях вокруг гиалокластов развита маломощная кайма серовато-белого кальцита, иногда с признаками замещения (рис. 3в). Прожилки белого кальцита рассекают гематит-карбонатную породу и зачастую содержат включения халькопирита и сфалерита. Наряду с крупными гиалокластами в породе присутствуют более мелкие (до 0.1 мм) округлой и сглаженно-угловатой формы (рис. 3г). Кроме того, в серовато-белой карбонатной массе породы встречаются обломковидные гематит-кальцитовые агрегаты размером до 0.3–0.4 мм (рис. 3д). Для кальцита характерны примеси MgO (до 1.1 мас. %) и MnO (до 0.4 мас. %).

В основной массе породы обнаружены гип- и идиоморфные пористые метакристаллы пирита (рис. 3е), редкая вкрапленность халькопирита, сфалерита и галенита, а также мелкие включения доломита, кварца, апатита и редкие включения недиагностированного минерала урана. Особенностью минерального состава изученных пород является присутствие гнезд (размером до 0.5 мм) и прожилков талька. Сульфидные агрегаты в обломочных колчеданных рудах сцементированы светло-серым кальцитом и светло-зеленоватыми агрегатами талька и хлорита, часто окаймленными тонкими слоями белого карбоната.

Гематит-хлорит-карбонатные породы с обломками хлоритизированных гиалокластов и сульфидной минерализацией и (рис. 4а) залегают на обломочных рудах, имеют пятнистую текстуру, содержат хлоритизированный гиалокластический материал, а также многочисленные прожилки и гнезда сульфидов. Основная масса породы сложена мелкозернистым карбонатом, содержащим вкрапленность гематита, доломита, апатита, гнезда кварца, а также агрегаты халькопирита, пирита, сфалерита, галенита, борнита и теннантита. Кальцит в породе

образует сплошные массы или пятна, в которых развиты ромбовидные кристаллы, зональное строение которых подчеркнуто тонкой вкрапленностью гематита, часто с включениями доломита (размер до 10–20 мкм) в ядре (рис. 4б, в). В составе кальцита определены примеси (мас. %): MgO (до 1.3), MnO (до 0.6) и FeO (до 0.8).

Обломки хлоритизированных гиалокластов в описываемых породах характеризуются сглаженно-угловатой формой, часто с конформными, изрезанными и зазубренными ограничениями. Хлоритизированные гиалокласты частично замещены гематитом и кальцитом с развитием колломорфно-почковидных, коррозионных, ячеистых структур с трещинами синерезиса (рис. 4г, д, е). Новообразованный кальцит находится на периферии хлоритовых агрегатов и в виде мелкой вкрапленности угловатых зерен в них. Остроугольные границы гиалокластов, частично замещенных кальцитом, часто подчеркнуты тонкой каймой, обогащенной гематитом (рис. 4ж). Химический состав хлорита гиалокластов характеризуется высокими содержаниями MgO (31.1 мас. %), Al₂O₃ (18.4 мас. %), SiO₂ (31.2 мас. %), относительно низкими количествами FeO + Fe₂O₃ (5.63 мас. %) и соответствует клинохлору (Mg_{4.44}Al_{1.01}Fe_{0.46}Mn_{0.05})_{5.96}(Al_{1.07}Si_{2.99}O₁₀)(OH)_{7.71}.

Сульфидная минерализация в гематит-хлорит-карбонатных породах представлена халькопиритовыми, пирит-халькопиритовыми и борнитовыми агрегатами, конкрециями пирита (диаметр до 0.5 мм), пирит-халькопиритовыми прожилками и тонкой вкрапленностью. Сульфиды меди и железа содержат микровключения весьма низкопробного самородного золота (500–550 ‰), акантита Ag₂S, алтаита PbTe (Se 1.2 мас. %, Ag до 1.5 мас. %), гессита Ag₂Te (Se до 0.9 мас. %), теллуrowисмутита Bi₂Te₃, раклиджита PbBi₂Te₄, Cu- и Se-содержащего кервеллеита Ag₄TeS (Cu до 5.8 мас. %, Se до 2.8 мас. %) и Se-содержащего галенита PbS (Se до 3.6 мас. %) (рис. 5а, б, в). В ассоциации с борнитом и халькопиритом в карбонатной массе иногда встречаются агрегаты и включения теннантита (Sb до 1.7 мас. %) (рис. 5г). В карбонатной массе, окружающей сульфидные сростки, вместе с тонкой вкрапленностью гематита обнаруживаются мельчайшие (до 1–2 мкм) включения галенита, теллуrowисмутита, алтаита и гессита (рис. 5д). Изредка эти микровключения присутствуют в хлоритизированных гиалокластах. В пиритовых конкрециях встречаются единичные кристаллокласты хромшпинелидов размером до 30 мкм, по составу соответствующие субферрихромиту (мас. %):

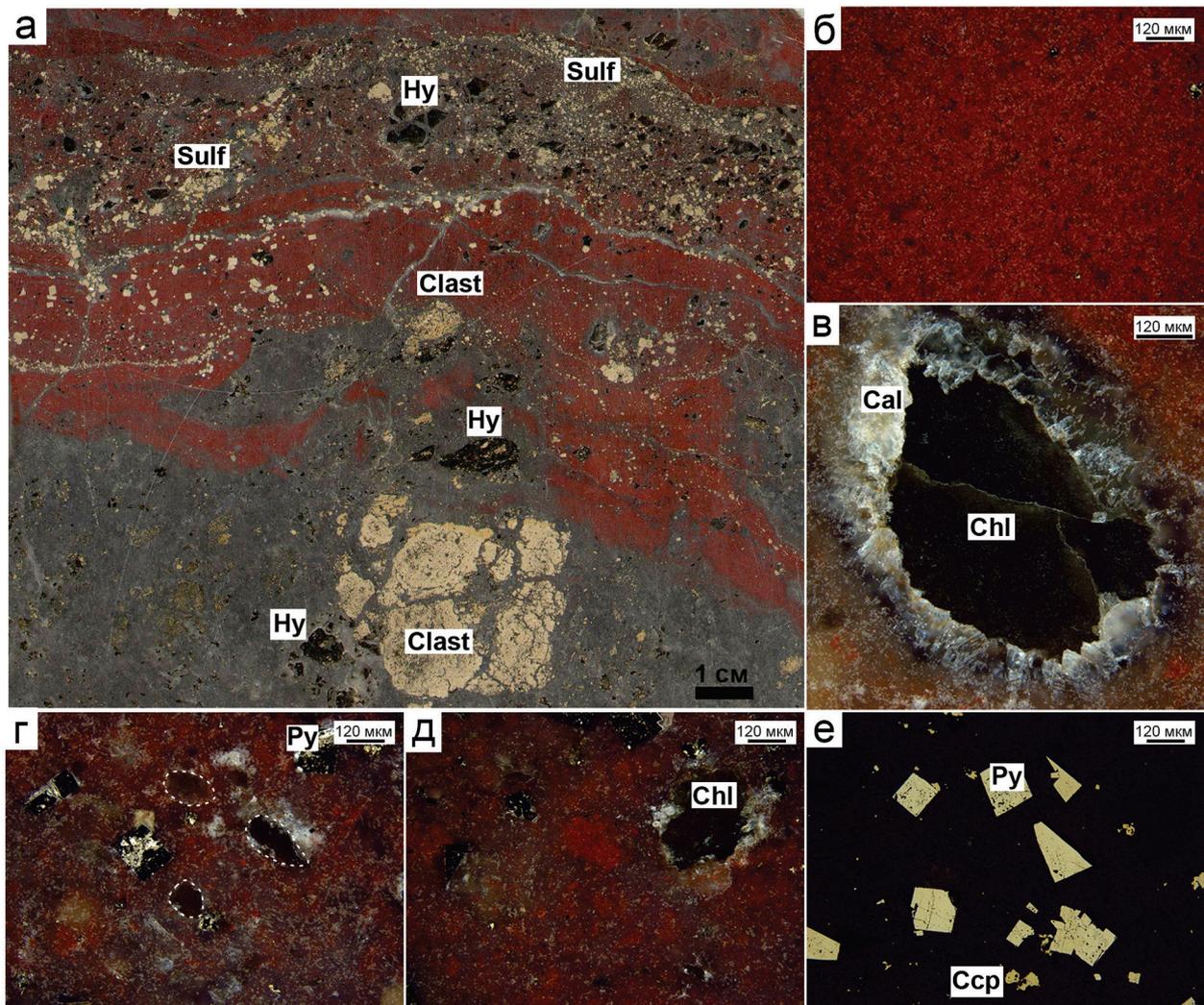


Рис. 3. Контакт гематит-карбонатной (красное) и силикатно-карбонатной (светло-серое) породы с рудокластами: а – контакт гематит-карбонатной породы с силикатно-карбонатной, содержащих гиалокласты (Hy), рудокласты (Clast) и наложенную сульфидную минерализацию (Sulf); б – массивная текстура основной гематит-карбонатной массы породы; в – хлоритизированный гиалокласт (Chl), окаймленный бесцветным кальцитом (Cal) в пестрой гематит-карбонатной массе; г – мелкие хлоритизированные гиалокласты (показаны белой пунктирной линией) и вкрапленность пирита (Py) в гематит-карбонатной массе; д – красные обломковидные гематит-карбонатные обособления в светло-серой карбонатной массе и хлоритизированный гиалокласт с каймой кальцита; е – вкрапленность идиоморфных кристаллов пирита и гнезда халькопирита (Ccp).

Фото а – полированный образец, б–е – отраженный свет (б–д – темнопольное изображение).

Fig. 3. Contact of hematite-carbonate (red) and silicate-carbonate (light gray) rock with sulfide clasts: а – contact of hematite-carbonate and silicate-carbonate rock with hyaloclasts (Hy), sulfide clasts (Sulf clast) and sulfide mineralization (Sulf); б – homogeneous hematite-carbonate aggregate; в – chloritized hyaloclast (Chl) with white calcite (Ca) rim in red hematite-carbonate aggregate; г – small chloritized hyaloclasts (white dotted line) and inclusions of pyrite (Py) grains in hematite-carbonate aggregate; д – fragment of red hematite-carbonate aggregate in light gray carbonate aggregate and chloritized hyaloclast with calcite rim; е – inclusions of euhedral pyrite crystals and chalcopyrite aggregate (Ccp).

Image а – polished sample, б–е – reflected light (б–д – dark-field images).

MgO 10.49, Al₂O₃ 6.97, Cr₂O₃ 57.57, MnO 0.33, FeO + Fe₂O₃ 23.77 (рис. 5е).

В этих породах установлены обломковидные гематит-карбонатные обособления размером до 0.5–1.0 мм, которые отличаются от вмещающей

карбонатной массы повышенным количеством тонкодисперсного гематита и характеризуются колломорфными (рис. 6а, б), глобулярными, радиально-лучистыми (рис. 6в, г), кристаллически-зернистыми структурами (рис. 6д–з), характерными для

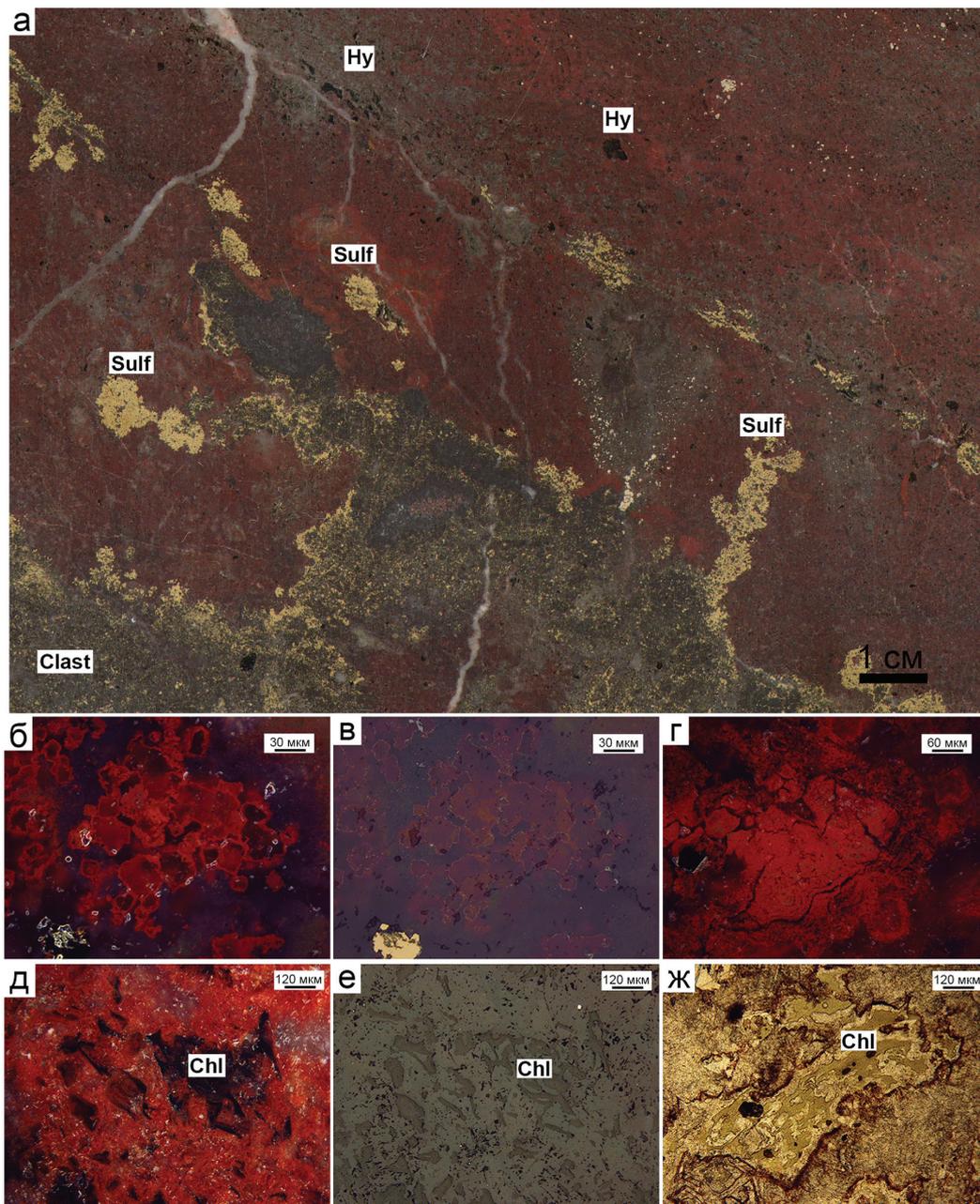


Рис. 4. Гематит-хлорит-карбонатная порода с наложенным халькопиритом: а – гематит-хлорит-карбонатная порода с гнездами халькопирита (Sulf) и пятнами, обогащенными хлоритизированными гиалокластами (Hy), контактирующая с обломочной карбонатно-сульфидной рудой (Clast); б, в – кристаллы кальцита, окаймленные тонкой зоной тонкодисперсного гематита; г – колломорфный гематит-карбонатный агрегат с трещинами синерезиса в окружении зональных индивидов кальцита; д, е – корродированные гематит-карбонатной матрицей хлоритизированные гиалокласты (Chl); ж – частично карбонатизированный гиалокласт с каймой тонкодисперсного гематита, оконтуривающей исходные границы гиалокласта.

Фото а – полированный образец, б–е – отраженный свет (б–д – темнопольное изображение), ж – поляризованный проходящий свет.

Fig. 4. Hematite-chlorite-carbonate rock with chalcopyrite: а – hematite-chlorite-carbonate rock with chalcopyrite aggregates (Sulf) and spots enriched in chloritized hyaloclasts (Hy) at the contact with clastic carbonate-sulfide ore (Clast); б, в – calcite crystals with a thin rim of dispersed hematite; г – colloform hematite-carbonate aggregate with syneresis cracks surrounded by zoned calcite; д, е – chloritized hyaloclasts (Chl) corroded by hematite-carbonate aggregates; ж – partly carbonatized hyaloclast with dispersed hematite rim, which outlines primary boundaries of hyaloclast.

Image а – polished sample, б–е – reflected light (б–д – dark-field images), ж – thin section without analyzer.

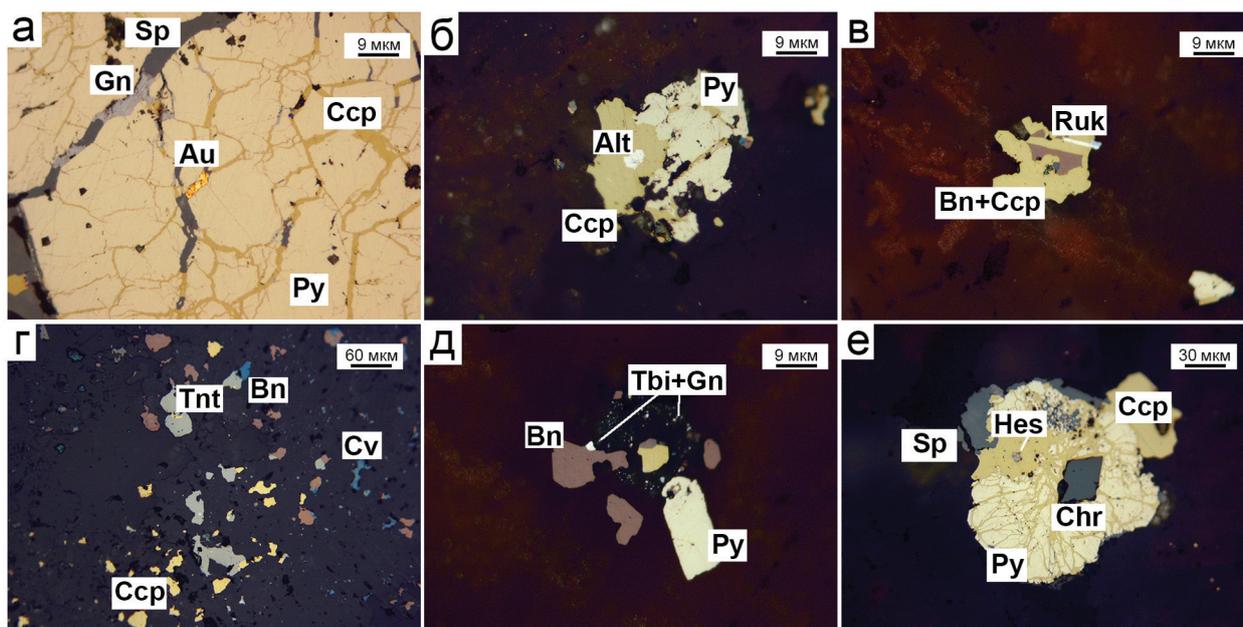


Рис. 5. Редкие минералы гематит-хлорит-карбонатных пород: а – микровключение самородного золота (Au) в прожилке халькопирита (Ccp), сфалерита (Sp) и галенита (Gn) в пиритовом агрегате (Py); б – микровключение алтаита $PbTe$ (Alt) в сростке халькопирита и пирита; в – пластинка раклиджита $PbBi_2Te_4$ (Ruk) в борнит-халькопиритовом (Bn+Ccp) агрегате; г – вкрапленность теннантита (Tnt), халькопирита, борнита и ковеллина (Cv) в гематит-карбонатной породе; д – микровключения теллурувисмутита Bi_2Te_3 и галенита (Tbi + Gn) в ассоциации с борнитом и пиритом в гематит-карбонатной массе; е – включения гессита Ag_2Te (Hes) и хромшпинелида (Chr) в сфалерит-халькопирит-пиритовом агрегате. Отраженный свет.

Fig. 5. Rare minerals in hematite-chlorite-carbonate rocks: а – inclusion of native gold (Au) in veinlet of chalcopyrite (Ccp), sphalerite (Sp) and galena (Gn) in pyrite aggregate (Py); б – inclusions of altaite $PbTe$ (Alt) in aggregate of chalcopyrite and pyrite; в – inclusion of rucklidgeite $PbBi_2Te_4$ (Ruk) in bornite-chalcopyrite (Bn + Ccp) aggregate; г – inclusions of tennantite (Tnt), chalcopyrite, bornite and covellite (Cv) in hematite-carbonate rock; д – inclusions of tellurobismuthite Bi_2Te_3 and galena (Tbi+Gn) in assemblage with bornite and pyrite in hematite-carbonate aggregate; е – inclusions of hessite Ag_2Te (Hes) and chromite (Chr) in sphalerite-chalcopyrite-pyrite aggregate. Reflected light.

рудокластов обломочных руд. Внутри гематит-карбонатных агрегатов обнаружены скопления гематита глобулярной, почковидной, угловатой или оскольчатой формы (рис. 6а). В них встречаются включения апатита, доломита, хлорита, магнетита, пирита, халькопирита, борнита, галенита и гессита (рис. 6б) и реликты сульфидов (рис. 6в, г).

Данные ЛА-ИСП-МС анализов. Обломковидные гематит-карбонатные обособления по сравнению с вмещающей гематит-карбонатной матрицей обогащены большей частью халько- и литофильных элементов-примесей (электронное приложение, лист 2). Содержания элементов-примесей во вмещающей кальцитовой матрице и гематит-карбонатных обособлениях, соответственно (г/т): Ti 37.3–59.7 → 99.5–654.0, V 23.7–62.8 → 98.1–445.0, Cu 14.3–109.0 → 72.4–6630.0, Zn 70.3–244.0 → 90.2–776.0, As 3.8–8.6 → 91.7–240.0, Sb 1.4–3.5 → 8.3–72.0, Zr 1.4–16.8 → 10.5–51.4, W 0.8–1.1 → 2.7–7.9, Pb

19.3–90.0 → 83.4–3840.0, Bi 0.2–2.4 → 3.3–93.0, Te 1.2–64 → 17.3–2560.0 (рис. 7).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Гематит-карбонатные породы Юбилейного месторождения по текстурно-структурным особенностям и комплексу минеральных ассоциаций отличаются от гематит-кремнистых и гематит-карбонатно-кремнистых продуктов гальмиролиза колчеданных руд (Аюпова, Масленников, 2005). В отличие от гематит-кремнистых пород колчеданных месторождений Урала на Юбилейном месторождении фрагменты гематит-карбонатных пород не встречаются в надрудной эффузивной толще или в виде обломков в колчеданных рудах. Их характерной особенностью является локализация над обломочными колчеданными рудами, сцементированными светло-серым карбонатным материалом,

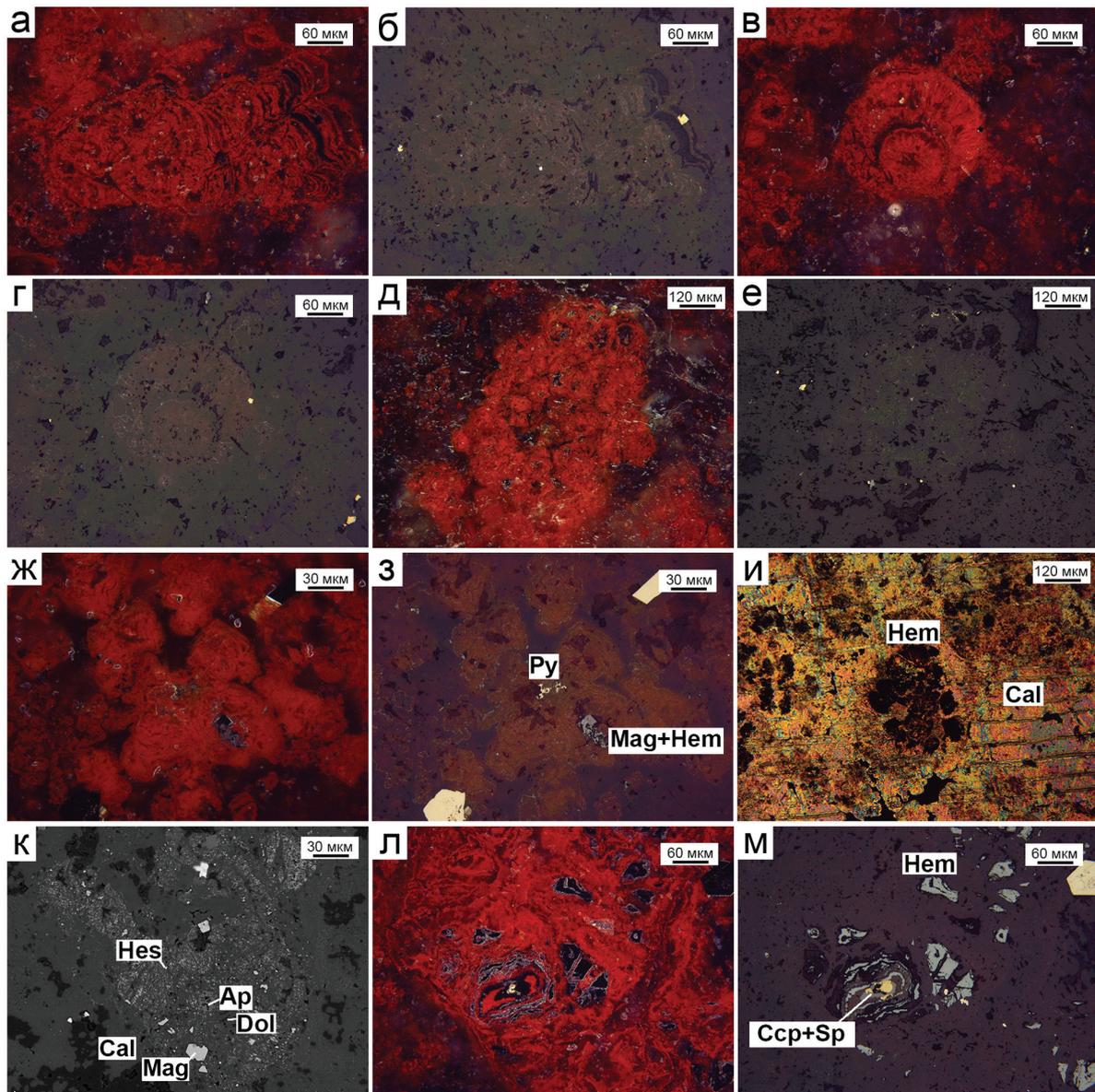


Рис. 6. Гематит-карбонатные псевдоморфозы по рудокластам в гематит-хлорит-карбонатных породах: а-г – гематит-карбонатные псевдоморфозы по обломку коллоидного агрегата пирита (а, б) и радиально-лучистому сульфидному агрегату (в, г); д, е – зернистый гематит-карбонатный агрегат с включениями гематита и реликтовых сульфидов; ж, з – сглаженно-угловатые гематит-карбонатные обособления с включениями пирита (Py), магнетита и гематита (Mag + Hem); и – кальцит (Cal) с глобулярными и угловатыми скоплениями гематита; к – гематит-карбонатная псевдоморфоза по сульфидному рудокласту с микровключениями апатита (Ap), доломита (Dol), гессита (Hes) и магнетита; л, м – оскольчатые и концентрически-зональные агрегаты гематита с реликтами пирит-сфалерит-халькопиритового (Ccp+Sp) рудокласта в гематит-карбонатной основной массе.

Фото а-з, л-м – отраженный свет (а, в, д, ж, л – темнопольное изображение), и – проходящий свет с анализатором; к – BSE изображение.

Fig. 5. Hematite-carbonate pseudomorphs after ore clasts in hematite-chlorite-carbonate rocks: а-г – hematite-carbonate pseudomorph after of colloform pyrite clast (а, б) and radial sulfide aggregate (в, г); д, е – granular hematite-carbonate clast with hematite and relict sulfides inclusions; ж, з – smoothed angular hematite-carbonate aggregate with inclusions of pyrite (Py), magnetite and hematite (Mag + Hem); и – calcite (Cal) with globular and angular clusters of hematite; к – hematite-carbonate pseudomorph after sulfide clast with microinclusions of apatite (Ap), dolomite (Dol), hessite (Hes) and magnetite; л, м – fragmented zoned aggregates of hematite with relics of pyrite-sphalerite-chalcopyrite (Ccp+Sp) clast in hematite-carbonate aggregate.

Image а-з, л-м – reflected light (а, в, д, ж, л – dark-field images), и – thin section with analyzer, к – BSE image.

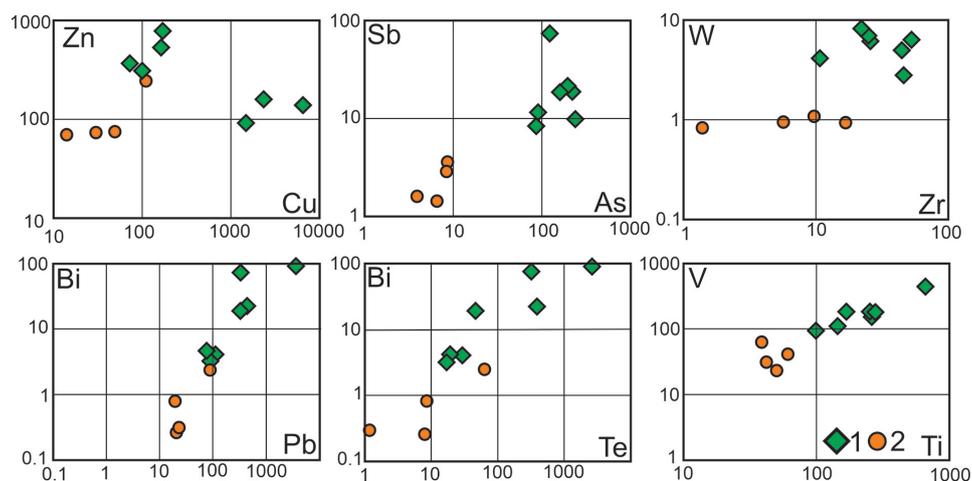


Рис. 7. Соотношение между элементами-примесями в гематит-карбонатных агрегатах по данным ЛА-ИСП-МС анализов.

1 – вмещающие гематит-карбонатные агрегаты породы; 2 – обломковидные гематит-карбонатные обособления.

Fig. 7. Correlation of selected trace elements in hematite-carbonate aggregates according to LA-ICP-MS analysis.

1 – hematite-carbonate aggregates of rock; 2 – hematite-carbonate clasts.

содержание которого в рудах может превышать 50 %. О перекристаллизации исходного гематит-карбонатного субстрата свидетельствует широкое распространение кристаллов кальцита с ростовыми зонами, заполненными включениями тонко- и мелкодисперсного гематита. Предполагаемые первичные текстуры и структуры (колломорфные, глобулярные, пятнистые, микробрекчиевые) породы сохранились в образцах в виде обломковидных гематит-карбонатных обособлений. Характерной особенностью гематит-карбонатных обособлений является относительно низкие содержания гематита (~5–10 %) по сравнению с гематитовыми псевдоморфозами по рудокластам на колчеданных месторождениях Урала, например, Молодежном (до 80–90 %) (Аюпова, Масленников, 2013, 2018).

По структурно-текстурным и минералогическим особенностям гематит-карбонатные обособления определяются в одних случаях как псевдоморфозы по сульфидным рудокластам, а в других – по гиалокластам. Замещение сульфидных обломков подтверждается сходством текстур, структур (почковидные, колломорфные, радиально-лучистые, кристаллически-зернистые) и размеров (0.1–0.5 мм) гематит-карбонатных обособлений и рудных фрагментов в сульфидных гравийных и алевропесчаных отложениях (Целуйко и др., 2019). В гематит-карбонатных обломковидных обособлениях сохраняются мелкие реликты пирита, отличающиеся от новообразованных метакристаллов по форме

и размеру индивидов, агрегаты гематита угловатой формы, зерна магнетита, реликтовые включения галенита, халькопирита, борнита и гессита.

Гематит-карбонатные обломковидные обособления, по-видимому, наследуют содержания элементов-примесей от замещаемых рудокластов что выражается в их обогащении примесями Cu, Zn, Pb, As, Sb по сравнению с вмещающей карбонатной матрицей. Включения галенита, гессита и, вероятно, алтаита и теллурувисмутита обусловили повышенные концентрации Pb, Bi и Te в гематит-карбонатных агрегатах.

Новообразованный халькопирит образует прожилки, пятна и гнезда в гематит-карбонатных породах, пирит формирует метакристаллы и конкреции. Часть сульфидов присутствует в прожилках светлосерого и белого кальцита, секущих гематит-карбонатную массу, что указывает на их более поздний, наложенный характер. Включения хромшпенелидов в пиритовых конкрециях по химическому составу соответствуют шпинелидам из бонинитов рудовмещающей баймак-бурибаевской свиты (Косарев и др., 2018), выступавшими в роли источника вулканогенного и гиалокластического материала при формировании пород. Присутствие редких минералов в халькопирит-пиритовых агрегатах характерно и для мелкообломочных сульфидных отложений (Целуйко и др., 2019). Предполагается, что сульфидный рудокласты, попавшие в гематит-карбонатные породы и обогащенные Au, Ag, Pb, Te, Bi,

As и другими элементами, стали источниками элементов для новообразованных включений самородного золота, акантита, галенита, теллуридов и теннантита в реликтах исходных рудокластов и новообразованных сульфидах. Метакристаллы пирита с многочисленными включениями кальцита, доломита и апатита в гематит-карбонатных породах напоминают сульфидную минерализацию в кремнистых алевропелитах (Целуйко и др., 2018). Эти признаки свидетельствуют о сходстве процессов диа-, ката- и метагенетической трансформации сульфидов в мелкообломочных сульфидных рудах, околорудных кремнистых отложениях и гематит-карбонатных породах на месторождении (Целуйко и др., 2018).

В гематит-карбонатных породах Юбилейного месторождения наблюдаются хлоритизированные гиалокласты, в различной степени замещенные гематит-карбонатным и карбонатным веществом. Признаками апогиалокластического происхождения гематит-карбонатных обособлений являются реликты гиалокластов, превращенные в хлоритовые агрегаты, глобулярные структуры гематит-карбонатных агрегатов и разнонаправленные трещины синерезиса. В гематит-карбонатных обособлениях, сформированных по гиалокластам, включения сульфидов встречаются реже чем в апосульфидных агрегатах.

Гематит-карбонатные породы на колчеданных месторождениях Урала описаны на Талганском, им. XIX Партсъезда и Подольском месторождениях (Аюпова, Масленников, 2005; Maslennikov et al., 2012). Карбонатный материал в этих породах присутствует как в виде фрагментов известняков, замещенных гематит-кварцевым материалом, так и в виде аутигенных карбонатов, образованных при преобразовании гиалокластов (Аюпова, Масленников, 2005). На Юбилейном месторождении в надрудной толще не встречаются известняки, но упоминаются участки наложенной карбонатизации в околорудных метасоматитах (Воробьев и др. 1973ф). Предполагается, что существенная примесь карбонатов в сульфидных рудах предопределила специфические условия процессов субмаринного гипергенеза и гальмиролиза, при котором происходило замещение обломков сульфидов и гиалокластического материала гематит-карбонатным веществом. Гематит-карбонатные породы, содержащие обломковидные обособления с реликтами сульфидов и гессита, характеризующиеся повышенными содержаниями элементов-примесей, могут быть отнесены к карбонатным аналогам госсанитов. Остальные гематит-карбонатные породы,

содержащие хлоритизированные гиалокласты и наложенную сульфидную минерализацию, вероятно, являются карбонатными аналогами гематит-кремнистых джасперитов.

ЛИТЕРАТУРА

Аюпова Н.Р., Масленников В.В. (2005) Гальмиролититы Узельгинского колчеданосного поля (Южный Урал). Миасс, УрО РАН, 199 с.

Аюпова Н.Р., Масленников В.В. (2013) Биоморфные структуры в железисто-кремнистых отложениях колчеданосных палеогидротермальных полей Урала. *Литология и полезные ископаемые*, 5, 486–504.

Аюпова Н.Р., Масленников В.В., Котляров В.А., Никандрова Н.К. (2015) Минеральные преобразования гиалокластиков в процессах литогенеза в колчеданосных районах Урала. *Минералогия*, 2, 18–30.

Аюпова Н.Р., Масленников В.В. (2018) Псевдоморфозы гематита по рудокластам в госсанитах Молодежного медно-цинково-колчеданного месторождения (Южный Урал). *Минералогия*, 4(4), 11–21.

Аюпова Н.Р., Целуйко А.С., Масленников В.В. (2012) Минеральный состав слоистых сульфидных руд Юбилейного медно-цинково-колчеданного месторождения (Южный Урал). *Материалы IX межрегиональной научно-практической конференции «Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий»* Уфа, ДизайнПолиграфСервис, 14–17.

Воробьев В.В., Попов Е.В., Сапонов А.В., Антошкин Д.М., Попова Л.П. (1973ф) Отчет о детальной разведке Юбилейного медноколчеданного месторождения на Южном Урале в 1969–73 гг. Бурибай, Т. 1, 351 с.

Гаврилов А.А. (1972) Эксгальциционно-осадочное рудонакопление марганца. М.: Недра, 216 с.

Зайков В.В. (1991) Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин: на примере колчеданосных зон Урала и Сибири. М.: Наука, 206 с.

Зайков В.В., Анкушева Н.Н. (2013) Гематит-кварцевые постройке золотоносного поля Лисьи горы – результат гидротермальной деятельности в магнитогорской палеоостроводужной зоне. *Литосфера*, 5, 57–74.

Косарев А.М., Светов С.А., Чаженина С.Ю., Шафигуллина Г.Т. (2018) Бонинитовые вариолиты Бурибайского вулканического комплекса Южного Урала: минералогия, геохимия и условия образования. *Литосфера*, 18(2), 246–279.

Масленников В.В. (1999) Седиментогенез, гальмиролиз и экология колчеданосных палеогидротермальных полей (на примере Южного Урала). Миасс, Геотур, 348 с.

Масленников В.В., Аюпова Н.Р. (2007) Кремнисто-железистые породы Узельгинского колчеданосного поля (Южный Урал). *Литосфера*, 2, 106–129.

Пуркин А.В., Денисова Т.А. (1987) Геологические критерии прогнозирования и поисков на Урале скрытых стратиформных медноколчеданных месторождений, сформированных по продуктам субмаринного выветривания базальтов. Свердловск, Уралгеология, 190 с.

Серавкин И.Б. (2013) Корреляция состава руд и рудовмещающих пород в вулканогенных колчеданных месторождениях (на примере Южного Урала). *Геология руд. месторождений*, 55(3), 238–258.

Серавкин И.Б., Косарев А.М., Пучков В.Н. (2017) Геодинамические условия формирования колчеданных месторождений Магнитогорской мегазоны Южного Урала и критерии для их поисков. *Геология руд. месторождений*, 59(3), 220–237.

Старикова Е.В., Брусницын А.И., Жуков И.Г. (2004) Палеогидротермальная постройка марганцевого месторождения Кызыл-Таш, Южный Урал: строение, состав, генезис. СПб.: Наука, 230 с

Татарко Н.И. и др. (2011ф) Проект на доразведку запасов по объекту «Юбилейное медно-цинково-колчеданное месторождение» на 2011–2013 гг. ОАО Башкиргеология. Сибайский филиал.

Теленков О.С., Масленников В.В. (1995) Автоматизированная экспертная система типизации кремнистожелезистых отложений палеогидротермальных полей Южного Урала. Миасс: ИМин УрО РАН, 200 с.

Целуйко А.С., Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Масленникова С.П. (2017) Минеральные и текстурно-структурные особенности рудных фаций Юбилейного медноколчеданного месторождения (Южный Урал). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*, 4, 50–56.

Целуйко А.С., Масленников В.В., Артемьев Д.А. (2018) Микротопохимия конкреций пирита в кремнистых алевропелитах Юбилейного медноколчеданного месторождения (Южный Урал) по данным ЛА-ИСП-МС. *Литосфера*, 4, 621–641.

Целуйко А.С., Масленников В.В., Аюпова Н.Р., Масленникова С.П., Данюшевский Л.В. (2019) Теллуридная минерализация в обломочных рудах медноколчеданного месторождения Юбилейное (Южный Урал). *Геология руд. месторождений*, 61(2), 40–71.

Ayupova N.R., Melekestseva I.Yu., Maslennikov V.V., Tseluyko A.S., Blinov I.A., Beltenev V.E. (2018) Uranium accumulation in modern and ancient Fe-oxide sediments: examples from the Ashadze-2 hydrothermal sulfide field (Mid-Atlantic Ridge) and Yubileynoe massive sulfide deposit (South Urals, Russia). *Sedimentary geology*, 367, 164–174.

Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Herrington R.J., Denyushevskiy L.V., Large R.R. (2012) Ferruginous and manganiferous haloes around massive sulphide deposits of the Urals. *Ore Geology Reviews*, 47, 4–41.

Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Safina N.P., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Yu., Large R.R., Herrington R.J., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Maslennikova, S.P., Tossalina S.G. (2019) Mineralogical features of ore diagenites in the Urals massive sulfide deposits, Russia. *Minerals*, 9, 150.

REFERENCES

Ayupova N.R., Maslennikov V.V. (2018) Pseudomorphic hematite after ore clasts of gossanites of the Molodezhnoe Cu-Zn massive sulfide deposit (South Urals). *Mineralogiya (Mineralogy)*, 4(4), 11–21 (in Russian)

Ayupova N.R., Maslennikov V.V. (2005) *Halmyrolytites of the Uzelga massive sulfide bearing field, South Ural*. Miass, UrO RAN, 199 p. (in Russian)

Ayupova N.R., Maslennikov V.V. (2013) Biomorphous textures in the ferruginous-siliceous rocks of massive sulfide-bearing paleohydrothermal fields in the Urals. *Lithology and Mineral Resources*, 48(5), 438–455. <https://doi.org/10.1134/S0024490213030024>

Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Kotlyarov V.A., Nikandrova N.K. (2015) Mineral transformations of hyaloclastite during lithogenesis in massive sulfide bearing regions of Urals. *Mineralogy*, 2, 18–30. (in Russian)

Ayupova N.R., Melekestseva I.Yu., Maslennikov V.V., Tseluyko A.S., Blinov I.A., Beltenev V.E. (2018) Uranium accumulation in modern and ancient Fe-oxide sediments: examples from the Ashadze-2 hydrothermal sulfide field (Mid-Atlantic Ridge) and Yubileynoe massive sulfide deposit (South Urals, Russia). *Sedimentary geology*, 367, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.02.009>

Ayupova N.R., Tseluyko A.S., Maslennikov V.V. (2012) Mineral composition of layered sulfide ores of the Yubileynoe massive sulfide deposit (South Urals). *Proceedings of the IX regional scientific and practical conference «Geology, minerals and problems of geoecology of Bashkortostan, the Urals and adjacent territories»* Ufa, Disainpoligrafservice, 14–17.

Gavrilov A.A. (2005) *Exhalation-sedimentary ore accumulation of manganese*. M., Nedra, 216 p. (in Russian)

Kosarev A.M., Svetov S.A., Chazhengina S.Yu., Shafigullina G.T. (2018) Boninitic variolites of the Buribay volcanic complex the Southern Urals: mineralogy, geochemistry and formation conditions. *Litosfera (Lithosphere (Russia))*, 18(2), 246–279. (in Russian)

Maslennikov V.V. (1999) *Lithogenesis and massive sulfide deposits forming processes*. Miass, Imin UrO RAN, 348 p. (in Russian)

Maslennikov V.V., Ayupova N.R. (2007) Siliceous-ferruginous rocks in the Uzelga massive sulfide bearing field, South Urals. *Lithosphere (Russia)*, 2, 106–129. (in Russian)

Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Herrington R.J., Denyushevskiy L.V., Large R.R. (2012) Ferruginous and manganiferous haloes around massive sulphide deposits of the Urals. *Ore Geology Reviews*, 47, 4–41. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.03.008>

Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Safina N.P., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Yu., Large R.R., Herrington R.J., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Maslennikova S.P., Tossalina S.G. (2019) Mineralogical features of ore diagenites in the Urals massive sulfide deposits, Russia. *Minerals*, 9, 150. <https://doi.org/10.3390/min9030150>

Purkin A.V., Denisova T.A. (1987) *Geological criteria for forecasting and prospecting in Urals for hidden stratiform copper massive deposits formed by products of submarine weathering of basalts*. Sverdlovsk, Uralgeologiya, 190 p. (in Russian)

Seravkin I.B. (2013) Correlation between compositions of ore and host rocks in volcanogenic massive sulfide deposits of the Southern Urals. *Geology of Ore Deposits*, 55(3), 207–224. <https://doi.org/10.1134/S1075701513030057>

Seravkin I.B., Kosarev A.M., Puchkov V.N. (2017) Geodynamic conditions of formation of massive sulfide deposits in the Magnitogorsk Megazone, Southern Urals, and prospecting criteria. *Geology of Ore Deposits*, 59(3), 227–243. <https://doi.org/10.1134/S1075701517030059>

Starikova E.V., Brusnitsyn A.I., Zhukov I.G. (2004) *Paleohydrothermal mound of the Kyzyl-Tash manganese deposit, the Southern Urals: structure, composition, genesis*. St. Petersburg, Nauka, 230 p. (in Russian)

Tatarko N.I. et al. (2011) Project for additional exploration of reserves on the object “Yubileynoe copper-zinc VMS deposit” for 2011–2013. Sibai branch of Bashkirgeologia.

Telenkov O.S., Maslennikov V.V. (1995) *Automated expert system for typification of ferruginous rocks of paleohydrothermal fields of the Southern Urals*. Miass, IMIN UrO RAN, 200 p.

Tseluyko A.S., Maslennikov V.V., Aupova N.R., Maslennikova S.P. (2017) Mineral and textural-structural features of the ore facies of Yubileynoye massive sulfide

deposit (the Southern Urals). *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka (Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration)*, 4, 50–56. (in Russian) <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2017-4-50-56>

Tseluyko A.S., Maslennikov V.V., Artem'yev D.A. (2018) Microtopochemistry of pyrite nodules of siliceous siltstones from the Yubileynoe massive sulfide deposit (the Southern Urals): LA-ICP-MS data. *Litosfera (Lithosphere (Russia))*, 4, 621–641. (in Russian) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-4-621-641>

Tseluyko, A.S., Maslennikov, V.V., Ayupova, N.R., Maslennikova S.P., Danyushevsky L.V. (2019) Tellurium-Bearing Mineralization in Clastic Ores at the Yubileynoe Copper Massive Sulfide Deposit (Southern Urals). *Geology of Ore Deposits*, 61, 133–161 <https://doi.org/10.1134/S1075701519020053>

Vorobyev V.V., Popov E.V., Saponov A.V., Antoshkin D.M., Popova L.P. (1973) *Report on the detailed exploration of the Yubileynoe massive sulfide deposit in South Urals in 1969–73*. Buribai, vol. 1, 351 p. (in Russian)

Zaykov V.V. (1991) *Volcanism and sulfide mounds of the paleoceanic structures: by the example of the Urals and Siberia massive sulfide bearing zones*. M.: Nauka, 206 p.

Zaykov V.V., Ankusheva N.N. (2013) Hematite-quartz mounds from the Lis'y Gory Au-bearing field: A result of hydrothermal activity at the Magnitogorsk paleoisland arc zone. *Litosfera (Lithosphere (Russia))*, 5, 57–74. (in Russian)

Информация об авторах

Целуйко Александр Сергеевич – младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; tseluyko@mineralogy.ru

Аюпова Нурия Радитовна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; aupova@mineralogy.ru

Артемьев Дмитрий Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; artemyev@mineralogy.ru

Рассомахин Михаил Анатольевич – младший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия, miha_rassomahin@mail.ru

Котляров Василий Алексеевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; kotlyarov@mineralogy.ru

Information about the authors

Aleksandr S. Tseluyko – Junior Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia; tseluyko@mineralogy.ru

Nuria R. Ayupova – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia; aupova@mineralogy.ru

Dmitriy A. Artem'yev – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia; artemyev@mineralogy.ru

Mikhail A. Rassomakhin – Junior Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia; miha_rassomahin@mail.ru

Vasiliy A. Kotlyarov – Candidate of Physical-Mathematical Sciences, Leading Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia; kotlyarov@mineralogy.ru