

УДК 553.435, 549.3+549.454.2

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

Посвящается 30-летию начала отработки Сафьяновского медноколчеданного месторождения

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЖИЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ЮЖНОГО ФЛАНГА САФЬЯНОВСКОГО МЕДНО-ЦИНКОВО-КОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СРЕДНИЙ УРАЛ)

Н.П. Сафина¹, А.В. Коровко², И.А. Блинов¹, Н.Н. Анкушева¹, М.А. Рассомахин¹, К.А. Филиппова¹

¹ Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; natali.safina2015@yandex.ru ² Институт геологии и геохимии УрО РАН, ул. Академика Вонсовского 15, г. Екатеринбург, 620016 Россия

Статья поступила в редакцию 07.11.2024 г., после доработки 12.12.2024 г., принята к печати 16.12.2024 г.

Аннотация. В статье представлены результаты исследований сульфидных и флюоритовых жил, залегающих во вмещающих породах южного фланга Сафьяновского медноколчеданного месторождения (Средний Урал). Сульфидные жилы представлены сфалерит-галенитовыми и сфалерит-пирит-халькопиритовыми разновидностями, в которых с сульфидами ассоциируют гипс, карбонаты, барит или кварц. Флюорит в породе тесно связан с карбонатами (доломит, кальцит, сидерит), каолинитом и магнезиокарфолитом. Изученные типы жил отличаются по химическому составу и набору редких минералов. В галенит-сфалеритовых жилах повышенные содержания Сd и Ag связаны с присутствием сфалерита и теннантита-(Zn) с примесью Ag (до 1.09 мас. %). Повышенное содержание Cu, Sn, In, Se, Te и Bi сфалерит-пирит-халькопиритовых жил объясняется присутствием теннантита-(Zn), энаргита, станноидита, сакураиита (?), виттихенита, гессита и Se-содержащего галенита. Во флюоритовых жилах выявлены повышенные содержания (г/т) Th (1.69) и U (4.79), а также ΣРЗЭ + Y (447.00). Минералы-концентраторы РЗЭ представлены фторкарбонатами (синхизит-(Nd) (преобладает), синхизит-(Y), синхизит-(Ce), бастнезит), которые тесно связаны с наложенными доломитом и каолинитом. На основании изучения флюидных включений в гипсе из пирит-халькопиритовых жил установлено, что гипс и ассоциирующая с ним медная минерализация отлагалась из водного Na-K хлоридного флюида при температуре 210-150 °С. В составе флюида, участвовавшего в образовании флюоритовых жил, присутствовали хлориды Na, K, Ca и Mg. Температура образования флюорита варьировала от 190 до 280 ℃. Новые данные объясняют особенности минерального состава богатых медных руд месторождения с флюоритом и повышенные концентрации некоторых элементов (включая РЗЭ) в их составе.

Ключевые слова: Сафьяновское медноколчеданное месторождение, минералогия жил, редкие минералы, флюидные включения, условия образования.

Финансирование: Работы проведены в рамках госбюджетных тем № 122031600292-6 (Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН) и № 123011800009-9 (Институт геологии и геохимии УрО РАН).

Благодарности: Авторы благодарны главному геологу АО «Сафьяновская медь» Н.В. Лещеву за помощь в организации полевых исследований, А.И. Брусницыну и редакторам журнала за замечания, которые были учтены при подготовке окончательного варианта статьи, П.В. Хворову, Е.Д. Зенович, М.Н. Маляренок – за выполнение анализов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью. Вклад авторов. Н.П. Сафина – разработка концепции, исследования, интерпретация полученных данных, визуализация, написание черновика рукописи; А.В. Коровко – разработка концепции, интерпретация полученных данных; И.А. Блинов – аналитические/экспериментальные работы, визуализация; Н.Н. Анкушева – аналитические/экспериментальные работы, редактирование финального варианта рукописи; М.А. Рассомахин – аналитические/экспериментальные работы, визуализация; К.А. Филиппова – аналитические/экспериментальные работы. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

Для цитирования: Сафина Н.П., Коровко А.В., Блинов И.А., Анкушева Н.Н., Рассомахин М.А., Филиппова К.А. Минералогические особенности и физико-химические условия образования жильной минерализации южного фланга Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения (Средний Урал). Минералогия, 2024, 10(4), 75–97. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-4.

Dedicated to the 30th anniversary of the beginning of exploitation of the Saf yanovka massive sulfide deposit

MINERALOGICAL FEATURES AND PHYSICOCHEMICAL FORMATION CONDITIONS OF VEIN MINERALIZATION OF THE SOUTHERN FLANK OF THE SAF YANOVKA MASSIVE SULFIDE DEPOSIT (CENTRAL URALS)

N.P. Safina¹, A.V. Korovko², I.A. Blinov¹, N.N. Ankusheva¹, M.A. Rassomakhin¹, K.A. Filippova¹

 ¹ South Ural Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, 456317 Russia; natali.safina2015@yandex.ru
 ² Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, ul. Akademika Vonsovskogo 15, Yekaterinburg, 620016 Russia

Received 07.11.2024, revised 12.12.2024, accepted 16.12.2024

Abstract. The paper presents the results of studies of sulfide and fluorite veins of the southern flank of the Saf yanovka massive sulfide deposit, Central Urals. The sulfide veins include sphalerite-galena and sphaleritepyrite-chalcopyrite types, in which sulfides are associated with gypsum, carbonates, barite or quartz. Fluorite in host rocks is closely related to carbonates (dolomite, calcite, and siderite), kaolinite and magnesiocarpholite. The sulfide veins differ in chemical composition and rare minerals. In galena-sphalerite veins, the higher Zn, Pb, Cd and Ag content is associated with the presence of sphalerite, galena and tennantite-(Zn) with Ag (up to 1.09 wt %). In sphalerite-pyrite-chalcopyrite veins, the accumulation of Cu, Sn, In, Se, Te and Bi is explained by the presence of tennantite-(Zn), enargite, stannoidite, sakuraiite (?), wittichenite, hessite and Se-bearing galena. The elevated (ppm) Th (1.69) и U (4.79) and REE + Y (447) content is determined in fluorite veins. The REE minerals include fluorcarbonates (synchisite-(Nd) (predominant), synchisite-(Y), synchisite-(Ce) and bastnäsite), which are closely associated with overprinted dolomite and kaolinite. The fluid inclusions study of gypsum from pyrite-chalcopyrite veins showed that the associated Cu mineralization formed from H₂O-Na-K chloride fluid at temperatures of 210–150 °C. The fluid, which was responsible for the formation of fluorite veins, contained Na, K, Ca n Mg. The formation temperatures of fluorite range from 190 to 280 °C. New data revealed the peculiarities of mineral composition of rich Cu ores with fluorite and also explain the higher content of some elements, including REEs.

Keywords: Saf yanovka massive sulfide deposit, vein mineralogy, rare minerals, fluid inclusions, formation conditions.

Funding: This study was supported by state contracts no. 122031600292-6 (South Ural Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS) and no. 123011800009-9 (Institute of Geology and Geochemistry UB RAS).

Acknowledgements. The authors are grateful to the chief geologist of JSC Saf'yanovskaya Med N.V. Leshchev for assistance in organizing field research, A.I. Brusnitsyn and the editors of the journal for comments, which were taken into account during the preparation of the final version of the manuscript, P.V. Khvorov, E.D. Zenovich and M.N. Malyarenok for analytical work.

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

Author contribution. N.P. Safina – conceptualization, investigation, visualization, writing – original draft; A.V. Korovko – conceptualization, investigation; I.A. Blinov – analytical/experimental work, visualization;

Минералогические особенности и условия образования жильной минерализации Сафьяновского месторождения 77 Mineralogical features and formation conditions of vein mineralization of the Saf yanovka massive sulfide deposit

N.N. Ankusheva – analytical/experimental work, writing – review & editing; M.A. Rassomakhin – analytical/ experimental work; K.A. Filippova – analytical/experimental work. All the authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

For citation: Safina N.P., Korovko A.V., Blinov I.A., Ankusheva N.N., Rassomakhin M.A., Filippova K.A. Mineralogical features and physicochemical formation conditions of vein mineralization of the southern flank of the Saf´yanovka massive sulfide deposit (Central Urals). Mineralogy, 2024, 10(4), 75–97. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-4

ВВЕДЕНИЕ

Сафьяновское медно-цинково-колчеданное месторождение - крупнейшее на Урале по запасам и объемам добычи – находится на Среднем Урале в 90 км к северо-востоку от г. Екатеринбурга и в 10 км северо-восточнее г. Реж (рис. 1а). Особенностью месторождения является широкое развитие гидротермально-метасоматической прожилкововкрапленной и жильной цинково-медной минерализации на нижних горизонтах месторождения по периметру основного тела гидротермально-осадочных сплошных колчеданных руд (Коровко и др., 1988, 1992; Язева и др., 1991; Коротеев и др., 1997; Прокин и др., 2003). Прожилково-вкрапленные руды в больших объемах локализованы в южной менее эродированной части месторождения, имеющей общее пологое падение на юг. Также для южной части месторождения характерно широкое распространение флюорита, обнаруженного в рудных телах, сульфидных жилах и метасоматитах (Сафина и др., 2021). В северной части месторождения, вскрытой и отработанной карьером до глубины 270 м, из нерудных жильных минералов распространены барит, кварц и карбонаты (Язева и др., 1991; Сорока и др., 2019). Ранее на месторождении детально были изучены барит-сульфидные жилы в северной части месторождения (Мурзин и др., 2010; Сафина и др., 2012) и барит-флюоритовые и сульфидно-барит-флюоритовые жилы в южной части на горизонтах -40 и -90 м (Сафина и др., 2021; Сорока и др., 2023). В барит-сульфидных жилах обнаружены такие редкие минералы как буланжерит, пираргирит, полибазит, диафорит, фаматинит и Zn-фрайбергит; в жилах с флюоритом – фторкарбонаты РЗЭ (синхизит-(Се), синхизит-(Ү), бастнезит). Данная работа является продолжением исследований жильной минерализации южного фланга Сафьяновского месторождения, которое в настоящее время отрабатывается подземным способом.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Сафьяновское месторождение находится в пределах Восточно-Уральской мегазоны (рис. 1б), а по структурному положению - в южной части Режевской структурно-формационной зоны (Коровко, Двоеглазов, 1991; Коровко и др., 1992, 2004ф; Язева и др., 1991). Месторождение залегает в пакете тектонических пластин силурийско-девонских островодужных комплексов. Фаунистически обоснованный возраст колчеданного оруденения отвечает пражскому ярусу нижнего девона (Коровко и др., 2017). Пакет пластин представляет собой интенсивно дислоцированный фрагмент вулканической постройки центрального типа в аллохтонном залегании. Центральная рудоносная пластина мощностью до 450 м включает вершинный фрагмент купольной палеовулканической постройки с привершинной депрессией субмеридионального простирания, сложенной массивными, флюидальными и флюидально-брекчиевидными дацитами и риодацитами, их лавокластитами и ксенолавокластитами. К депрессии приурочен сульфидный холм черного курильщика (Коровко и др., 1992; Коротеев и др., 1997; Масленников, 2006). В корневой части депрессии и в основании сульфидного холма развиты гидротермально-метасоматические прожилково-вкрапленные руды. Сульфидный холм имеет в поперечном сечении клиновидную, а в продольном - «грибообразную» форму с преимущественным развитием обломочных руд и сложными переходами к сульфидным циклитам в южном направлении (Сафина, Масленников, 2009). Породы рудоносной зоны Сафьяновского месторождения слабо катаклазированы и метаморфизованы. На месторождении не зафиксированы более поздние магматические породы.

Месторождение делится на две части: Северной и Южной (рис. 1в). Основная масса сплошных гидротермально-осадочных руд располагалась в северной части (Главная рудная залежь), вскрытой и отработанной карьером до глубины 270 м. В южной



Рис. 1. Географическая позиция Сафьяновского месторождения (а), его положение в структурах Урала (Пучков, 1993) (б) и генерализованный продольный геологический разрез (Коровко и др., 2004ф) (в).

Рис. 16: 1 – осадочные комплексы Восточно-Европейской платформы; 2 – моласса Предуральского краевого прогиба; 3 – осадочные породы Западно-Уральской мегазоны; 4 – метаморфический комплекс Центрально-Уральской мегазоны; 5 – островодужный комплекс Тагило-Магнитогорской мегазоны; 6 – Восточно-Уральская мегазона; 7 – осадочные породы Западно-Сибирской плиты; 8 – Главный Уральский разлом; 9 – Сафьяновское месторождение.

Рис. 1в: 1 – базальты и андезибазальты; 2 – риодациты, их лавокластиты и ксенолавокластиты; 3 – базальты; 4 – известняки; 5 – серпентинизированные ультрабазиты Режевского массива; 6 – массивные руды; 7 – штокверковые прожилково-вкрапленные руды; 8, 9 – тектонические границы между пачками и пластинами; 10 – контуры карьера; 1 – места и уровни отбора образцов жил: а – в 2017 г.; 6 – в 2023 г.

Fig. 1. Geographical location of the Saf'yanovka deposit (a), its position in the Urals structures (Puchkov, 1993) (6) and generalized longitudinal geological cross-section (Korovko et al., 2004) (B).

Fig 16: 1 – sedimentary rocks of the East European Platform; 2 – molasse of the Uralian foreland basin; 3 – sedimentary rocks of the West Uralian Megazone; 4 – metamorphic complex of the Central Uralian Megazone; 5 – island arc complex of the Tagil–Magnitogorsk Megazone, 6 – East Uralian Megazone; 7 – sedimentary rocks of the West Siberian Plate; 8 – Main Uralian Fault; 9 – Saf'yanovka deposit.

Fig 1B: 1 – basalts, basaltic andesites; 2 – rhyodacites, their clastic lava and xenolava clatites; 3 – basalts; 4 – limestones; 5 – serpentinized ultramafic rocks; 6 – massive ore; 7 – stockwork stringer-disseminated ores; 8, 9 – boundaries between blocks and sheets; 10 – contours of an open pit; 11 – sampling location: a - in 2017; 6 – in 2023.

части месторождения, перекрытой по Кондихинскому надвигу Режевским ультрабазитовым массивом, сплошные руды верхнего уровня образуют прерывистую цепочку линзовидных залежей мощностью от 30–50 см до нескольких десятков метров с богатой медной прожилково-вкрапленной и жильной минерализацией под ними. Рудная зона на этом участке прослежена до глубины в 550 м (рис. 1в), и в настоящее время отрабатывается подземным рудником.

На месторождении выделены массивные (серные, медные и медно-цинковые) и штокверковые прожилково-вкрапленные медные (рудные столбы), вкрапленные медные и медно-цинковые руды. Преобладающими текстурами руд являются массивная, брекчиевая, слоистая и прожилкововкрапленная. Главными рудными минералами месторождения являются пирит, халькопирит, сфалерит, второстепенными – марказит, галенит, теннантит, тетраэдрит, энаргит. Нерудные минералы представлены кварцем, баритом, хлоритом, доломитом, кальцитом, серицитом и флюоритом.

Штокверковые руды, залегающие под массивными сульфидными рудами преимущественно в серицит-кварцевых метасоматитах, образуют крупное тело богатых прожилково-вкрапленных медных руд, к периферии переходящих в медно-цинковые (Коровко и др., 1988; Язева и др., 1991; Прокин и др., 2003; Грабежев, 2004). Особенностью месторождения являются сопоставимые запасы массивных и штокверковых руд. Эксплуатационные запасы медных руд южного фланга Сафьяновского месторождения составляют порядка 11 млн т при средних содержаниях Си в богатых медных рудах до 4 % (данные отчетных материалов АО «Сафьянмедь»; Тучина, Ермакова, 2019).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы жил из измененной околорудной зоны в южной части месторождения на горизонте -200 м отобраны во время полевых работ 2023 г. Для сравнения рядом были отобраны породы без видимой сульфидной минерализации. Количественный минеральный состав пород определен рентгенофазовым анализом (РФА) (SHIMADZU XRD-6000, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, аналитики П.В. Хворов, Е.Д. Зенович). Оптико-микроскопическое изучение аншлифов проводилось на микроскопе Olympus BX51. Состав минералов изучен на электронном микроскопе с энергодисперсионным анализатором VEGA3 TESCAN (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, аналитики И.А. Блинов, М.А. Рассомахин). Условия съемки: область возбуждения 3 мкм, ток 6 нА, ускоряющее напряжение 20-30 кВ, предел обнаружения не превышает 0.2 мас. %. Количественный анализ проведен с использованием эталона MINM-25-53 фирм «ASTIMEX Scientific Limited» (стандарт № 01-044). По результатам ИСП-МС анализа (Agilent 7700Х, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, аналитик К.А. Филиппова) сульфидных жил и вмещающих их пород установлены их основные геохимические особенности. Условия формирования жил были определены с помощью термометрического исследования флюидных включений в гипсе и флюорите, сосуществующих с сульфидами. Термометрические исследования проведены в термокамере Linkam TMS-600 с программным обеспечением LinkSystem 32 DV-NC и оптическим микроскопом Olympus BX51 (аналитик Н.Н. Анкушева). Температуры эвтектики флюидных включений интерпретированы с использованием (Борисенко, 1982; Davis et al., 1990). Концентрации солей в растворах включений определены по финальным температурам плавления льда во включениях (Bodnar, Vityk 1994). Температуры гомогенизации включений приняты за минимальные температуры минералообразования (Рёддер, 1978). Обработка результатов измерений выполнена в программе Statistica.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Характеристика жил и вмещающих пород. На горизонте -200 м распространены зональные ветвящиеся жилы, сложенные галенитом, сфалеритом, халькопиритом, пиритом, флюоритом, карбонатом, кварцем и гипсом (рис. 2). Галенит-сфалеритовые жилы характеризуются изменчивой мощностью. В центральных зонах относительно мощных жил концентрируются карбонаты (смесь доломита и кальцита) и кварц (рис. 2а, в). С внешней стороны сульфидные жилы окружены осветленной (карбонатизированной) зоной мощностью до 2 см. В центральной части сфалерит-пиритхалькопиритовых жил располагаются агрегаты гипса, барита или кварца с размерами отдельных индивидов до 10-15 мм и редкой вкрапленностью сульфидов (рис. 2в, г). Далее следует промежуточная зона карбонатов мощностью до 50 мм и кварца – 10–15 мм. Карбонаты представлены доломитом и кальцитом. На отдельных участках отмечаются раздувы жил до 10 см. Внешняя зона жил сложена мелко- и крупнокристаллическим халькопиритом. Агрегаты крупнокристаллического халькопирита располагаются на границе с кварцем или гипсом, а по направлению к контакту размер кристаллов халькопирита с кварцем в интерстициях уменьшается. Встречаются участки с жилами халькопирита и кристаллами пирита кубической и сглаженно-угловатой октаэдрической формы размером до 7 мм. В породе, помимо жил, присутствует большое

количество тонких (1–2 мм) прерывистых прожилков и неравномерная вкрапленность халькопирита и пирита размером до 3 мм. Сафина Н.П., Коровко А.В., Блинов И.А., Анкушева Н.Н., Рассомахин М.А., Филиппова К.А. Safina N.P., Korovko A.V., Blinov I.A., Ankusheva N.N., Rassomakhin M.A., Filippova K.A.



Рис. 2. Текстурно-структурные особенности прожилково-вкрапленной минерализации южного фланга Сафьяновского месторождения: а – галенит-сфалеритовые (sph + gn) жилы с кварцем (qtz) и карбонатом (crb) в породе, обр. Саф23-(-200); б – зональные жилы с халькопиритом (chp), кварцем, карбонатом и гипсом, обр. Саф23-2; в – халькопирит во внешней зоне сменяется к центру карбонатом, баритом и гипсом (gps) (деталь снимка а); г – срастания галенита и сфалерита во внешней части сменяются к центру кварцем и карбонатом (деталь снимка б); д – жилы флюорита (flu) с карбонатом, обр. Саф23-1; е – жилы и вкрапленность пирита (ру) и халькопирита.

Длина линейки 1 см.

Fig. 2. Textural and structural features of stringer-disseminated mineralization of the southern flank of the Saf'yanovka deposit: a – galena-sphalerite (sph + gn) veins with quartz (qtz) and carbonate (crb) in host rock, sample Ca φ 23-(–200); δ – zoned veins with chalcopyrite (chp), quartz, carbonate and gypsum, sample Ca φ 23-2; B – chalcopyrite in the outer zone replaced by carbonate, barite and gypsum (gps) toward the center (detail of figure a); Γ – aggregates of galena and sphalerite in the outer part replaced by quartz and carbonate toward the center (detail of figure δ); π – fluorite (flu) vein with carbonate, sample Ca φ 23-1; e – veins and dissemination of pyrite (py) and chalcopyrite.

Scale bar is 1 cm.

Породы, вмещающие жилы, представлены брекчированными риодацитами светло-серого цвета. Минеральный состав породы по данным РФА: кварц (37–43 %), плагиоклаз (10–34%), доломит (до 28 %), магнезит (8 %), слюда (6–24 %), хлорит (7–18 %), пирит (2–4 %). В риодацитах, наряду с сульфидными жилами, прожилками и вкрапленностью, присутствуют *флюорит и карбонаты* (рис. 2д, е). Флюорит слагает жилы мощностью до 1 см и гнездообразные скопления размером до 5 см, имеет желто-зеленый оттенок и срастается с кварцем, карбонатами, силикатами и баритом. Видимая сульфидная минерализация в ассоциации с флюоритом не наблюдается.

Таблица 1

Химический состав жил южного фланга Сафьяновского месторождения (г/т)

Table 1

Обр. Обр. Обр. Саф23-1 Элементы Саф23-(-200) Саф23-2 3 1 2 607 654 Cu 1100 76100 2000 Zn 1000 392 2000 31900 831 Pb 15200 178 97.7 122 778 Ag 44.40 31.20 4.85 3.01 3.26 Cd 96.20 2.36 3.24 2.07 12.20 39.80 0.74 Sn 1.12 9.60 1.27 In 0.31 16.80 0.55 0.31 0.08 Sb 96.0 5.27 12.70 12.60 4.30 Mo 1.92 31.30 13.00 15.80 1.83 Ge 3.30 0.55 1.16 0.51 6.19 Ga 21.3 5.42 9.97 10.50 6.14 Co 0.87 1.69 1.13 0.95 0.74 Ni 4.84 8.58 7.45 5.66 0.48 Se 1.72 22.40 3.38 1.68 1.68 Te 0.30 6.39 0.54 0.30 0.30 Bi 0.07 23.5 1.78 1.12 1.50 Ba 522 209 761 741 1006 Sr 38.1 12.50 22.40 22.70 44.70 Th 1.69 0.36 1.33 1.36 0.64 4.79 U 0.87 4.28 4.44 0.70

Chemical composition of veins from the southern flank of the Saf'yanovka deposit (ppm)

Примечание. Содержания Cu, Zn, Pb – данные атомно-абсорбционной спектрометрии (аналитик М.Н. Маляренок). Остальные элементы – ИСП-МС анализ (аналитик К.А. Филиппова).

Note. The Cu, Zn, Pb content is analyzed using atomic absorption spectrometry (analyst M.N. Malyarenok). Other elements are analyzed using ICP-MS (analyst K.A. Filippova).

Химический состав жильной минерализации. Галенит-сфалеритовые жилы обогащены Zn, Pb, Cd, а также имеют повышенные концентрации Ag, Sb, Ga, Th и U (табл. 1). Пирит-халькопиритовые жилы характеризуются высокими концентрациями Sn, Mo, Bi, Se и In, а также Ge, Co, Ni, Te и минимальными – Ba, Sr, Th, U (табл. 1). Максимальные концентрации Ва (0.1 мас. %) и Sr (44.7 г/т) выявлены в жилах флюорита, которые также характеризуются повышенными содержаниями Cu, Zn, Pb, Cd, Sb, Мо, Ga, Ni, Th и U. Повышенные содержания РЗЭ + Ү (105.51 г/т) установлены в сфалерит-галенитовых жилах, более низкие – во вмещающих породах (43.61-70.92 г/т) и жилах флюорита (32.29-33.24 г/т) и, минимальные (15.04 г/т) – в пирит-халькопиритовых жилах (табл. 1). Наиболее высокие суммарные содержания РЗЭ и Ү (446.47 г/т) установлены в одном из анализов жилы флюорита (табл. 2). Среди редкоземельных элементов преобладают (г/т): Nd -120.0, Се – 92.4 и Ү – 80.2 (табл. 2).

В изученных жилах выделяются три основных типа распределения РЗЭ: 1) обогащенный Ү, легкими и средними РЗЭ, особенно Nd, – жилы флюорита; 2) обогащенный легкими РЗЭ с пиком La, средними – с пиком Eu и обедненные тяжелыми РЗЭ – для пород и жил флюорита; 3) обогащенный La и плавным снижением содержаний всех элементов от La к Lu – для халькопиритовых и сфалеритгаленитовых жил (рис. 3). Суммарное содержание РЗЭ + Y снижается от первого к третьему типу (табл. 2). Тренды распределения РЗЭ сопоставимы в породах и жилах флюорита для халькопиритовых и сфалеритгаленитовых и сфалеритгаленитовых жил соответственно. В распределении РЗЭ сульфидных жил отсутствует отчетливый пик Eu.

Минеральный состав жил. Минеральный состав жильной минерализации южного фланга Сафьяновского месторождения приведен в таблице 3.

Сфалерит-галенитовые жилы. Основной сульфидный минерал – сфалерит представлен трещиноватыми гипидиоморфными агрегатами, рассе-

Таблица 2

Содержание РЗЭ и У в жилах и вмещающих породах южного фланга Сафьяновского месторождения (г/т)

TT 11	1
Inhle	
Induc	4

	Обр.	Обр.	0	бр. Саф23-1	l	Обр. Саф-1, 2, 3		
Элементы	Саф23-(-200)	Саф23-2	1	2	3	1	2	3
La	16.90	1.54	4.23	3.91	28.40	7.19	5.36	8.69
Ce	35.00	3.30	9.03	8.41	92.40	13.80	11.10	18.40
Pr	4.36	0.44	1.17	1.11	19.50	1.67	1.37	2.14
Nd	16.70	1.88	4.56	4.51	120.0	6.45	5.50	8.99
Sm	3.60	0.55	1.10	1.10	33.40	1.43	1.44	2.48
Eu	1.39	0.20	0.47	0.45	10.70	0.93	0.63	1.62
Gd	3.70	0.70	1.16	1.21	32.30	1.58	1.79	3.32
Tb	0.58	0.11	0.20	0.20	3.83	0.23	0.29	0.48
Dy	2.71	0.71	1.30	1.27	14.90	1.39	1.83	2.81
Но	0.55	0.15	0.28	0.28	2.45	0.28	0.39	0.58
Er	1.95	0.44	0.89	0.90	5.14	0.85	1.25	1.67
Tm	1.25	0.06	0.13	0.13	0.52	0.13	0.18	0.23
Yb	1.72	0.38	0.96	0.97	2.69	0.87	1.28	1.49
Lu	0.27	0.06	0.15	0.15	0.39	0.14	0.21	0.25
Y	15.80	4.51	7.60	7.68	80.20	7.54	11.10	17.80
$\Sigma P3 \Im + Y$	105.51	15.04	33.24	32.29	446.47	44.51	43.61	70.92







Жилы: 1 – сфалерит-галенитовые; 2 – пирит-халькопиритовые, 3 – флюоритовые; 4 – породы без видимой сульфидной минерализации.

Fig. 3. Chondrite-normalized (McDonough, Sun, 1995) REE patterns of veins of the southern flank of the Saf'yanovka deposit.

Veins: 1 - sphalerite-galena; 2 - pyrite-chalcopyrite; 3 - fluorite; 4 - rocks without visible sulfide mineralization.

ченными прожилками галенита, кварца, доломита и реже пирита (рис. 4а, б). В галенитовых агрегатах присутствуют включения пирита и сфалерита. В ассоциации со сфалеритом установлена блеклая руда (теннантит-(Zn)) с примесью Ад (до 1.09 мас. %)) (табл. 4). Обильная вкрапленность галенита (раз-

мер зерен первые микрометры) и блеклой руды (размер зерен до 25 мкм) также встречается в доломите во внешних частях жил. Фторапатит встречается в виде кристаллов размером до 15 мкм в тесной ассоциации с доломитом, а также срастается с пиритом и галенитом (рис. 5а, б). В химическом
 Минералогические особенности и условия образования жильной минерализации Сафьяновского месторождения
 83

 Mineralogical features and formation conditions of vein mineralization of the Saf yanovka massive sulfide deposit
 83



Рис. 4. Строение и минеральный состав сфалерит-галенитовых (а, б) и сфалерит-пирит-халькопиритовых (в, г) жил: а, б – кварц (qtz) в центральной части жилы и срастания сфалерита (sph), галенита (gn) и пирита (py) по краям; в – доломит (dol) в центре жилы, сменяющийся к краю сфалеритом и халькопиритом (chp) с включениями трещиноватого пирита; г – эмульсионная вкрапленность халькопирита в сфалерите (деталь снимка а). Отраженный свет.

Fig. 4. Structure and mineral composition of sphalerite-galena (a, δ) and sphalerite-pyrite-chalcopyrite (B, Γ) veins: a, δ – quartz (qtz) in the center of the vein and aggregates of sphalerite (sph), galena (gn) and pyrite (py) in the rims; B – dolomite (dol) in the center of the vein replaced by sphalerite and chalcopyrite (chp) with inclusions of fractured pyrite in the rims; Γ – chalcopyrite emulsion in sphalerite (detail of figure a). Reflected light.



Puc. 5. Акцессорные минералы в галенит-сфалеритовых (a, б) и сфалерит-пирит-халькопиритовых (в, г) жилах: a – кристаллы апатита (ap) в срастании с доломитом (dol) и галенитом (gn) с пиритом (py); б – зерна монацита (mnz) в кварце (qtz), который замещается мусковитом (ms); в – монацит на контакте доломита и пирита с прожилками халькопирита

(chp); г – включения монацита в доломите и на контакте каолинита (kln) и доломита между пирит-халькопиритовыми агрегатами. Здесь и на рис. 6–9, BSE фото.

Fig. 5. Accessory minerals in galena-sphalerite (a, δ) and sphalerite-pyrite-chalcopyrite (B, Γ) veins: a – apatite crystals (ap) intergrown with dolomite (dol) and galena (gn) with pyrite (py); δ – monazite (mnz) grains in quartz (qtz) replaced by muscovite (ms); B – monazite at the contact of dolomite and pyrite with chalcopyrite veins (chp); Γ – monazite inclusions in dolomite and at the contact of kaolinite (kln) and dolomite between pyrite-chalcopyrite aggregates. Here and in Figs. 6–9, BSE images.

Минеральный состав жил южного фланга Сафьяновского месторождения *Таблица 3 Table 3*

Mineral composition of veins of the southern flank of the Saf'yanovka deposit

Типтимин		Минералы	
типы жил	Рудные	Нерудные	Акцессорные
Сфалерит- галенитовые, обр. Саф23-(-200)	Сфалерит, галенит, пирит, блеклая руда	Кварц, доломит, кальцит, мусковит, хлорит	Фторапатит, рутил, монацит-(Се)
Сфалерит-пирит- халькопиритовые, обр. Саф23-2	Пирит, халькопирит, сфалерит, халькозин, энаргит, борнит, ковеллин, блеклая руда	Кварц, гипс, доломит, кальцит, мусковит, барит, каолинит	Монацит-(Се), фторапатит, сидерит, галенит с примесью Se, станноидит, сакураиит , гессит, фазы Bi-Ag-Te-Se, Bi-S, Bi- Te-S, виттихенит, касситерит с примесью Ga
Флюоритовые, обр. Саф23-1	Пирит, сфалерит	Кварц, флюорит, доломит, кальцит, мусковит, каолинит, хлорит, магнезиокарфолит	Рутил, фторапатит, синхизит- (Nd), синхизит-(Y), синхизит- (Ce). бастнезит, галенит

Примечание. Жирным шрифтом выделены ранее не описанные минералы на месторождении. *Note.* Previously unknown minerals are typed in bold.

составе минерала присутствуют (мас. %): F до 2.95 и Cl до 0.36. Рутил образует скелетные кристаллы в доломите и срастается с пиритом. Монацит представлен многочисленными включениями размером от первых микрометров до 8 мкм в кварце (рис. 5б).

Сфалерит-пирит-халькопиритовые жилы. В составе жил преобладает халькопирит, пирит имеет подчиненное значение и развит, как правило, в виде катаклазированных кристаллов в халькопирите (рис. 4в). Сфалерит распространен в центральных частях жил на контакте с доломитом или гипсом (рис. 4г). Для зерен сфалерита характерна сглаженная форма и эмульсионная вкрапленность халькопирита. Второстепенными минералами жил являются энаргит, халькозин, борнит и ковеллин (табл. 3). В акцессорных количествах встречены галенит, станноидит, сакураиит (?), гессит, виттихенит, касситерит, фазы составов Bi-Ag-Te-Se, Bi-S и Bi-Te-S, приуроченные к халькопириту и, реже, к пириту. В доломите установлены монацит, фторапатит, гипс, сидерит, гессит и блеклая руда. Монацит встречается на границе между пиритом и доломитом, доломитом и каолинитом, а также по контурам зерен доломита (рис. 5в, г). В срастании с гипсом отмечен барит в виде гнезд размером до первых сотен микрометров.

Блеклая руда образует изометричные или угловатые включения размером до 30 мкм в халькопирите и доломите (рис. 6а). Состав блеклой руды соответствует теннантиту-(Zn) с примесями (мас. %): Ві до 6.99, Рb до 1.85 и Ад до 1.25 (табл. 4). Галенит обнаружен в халькопирите в ассоциации с блёклой рудой и в виде самостоятельных выделений размером до 10 мкм. Для последних характерна примесь Se (до 2.14 мас. %). Халькозин часто срастается с борнитом и энаргитом. Эти минералы образуют прожилки или пятна размером до 50 мкм в халькопирите и пирите. Также встречаются каймы халькозина вокруг халькопирита и сфалерита, которые впоследствии замещаются более поздним халькопиритом (рис. 6б, в). Станноидит, сакураиит (?) и галенит обнаружены в халькопирите и, реже, в пирите (рис. 6б, г, д). Размеры их зерен варьируют от первых микрометров до 12 мкм. В халькопирите станноидит образует многочисленные самостоятельные зерна и их скопления. В ассоциации с пиритом станноидит обнаружен на контакте между пиритом и халькопиритом. Химический состав станноидита (мас. %): 28.61 S, 10.54 Fe, 38.27 Cu, 4.01 Zn, 18.58 Sn, сумма 100.00. Кристаллохимическая формула станноидита, рассчитанная на сумму атомов, равную 25: Cu_{7.90}(Fe_{2.48}Zn_{0.81})_{53.28}Sn_{2.05}S_{11.73}.

Таблица 4

Химический состав теннантита в галенит-сфалеритовых (1–3) и сфалерит-пирит-халькопиритовых (4–10) жилах южного фланга Сафьяновского месторождения, мас. %

Table 4

S № ан. № лаб. Fe Cu Zn Sb Pb Сумма As Bi Ag 7.54 0.33 24346k 27.62 42.26 17.66 0.72 3.42 99.55 1 _ _ 2 243461 28.72 0.30 42.99 7.60 18.47 0.49 2.82 100.70 3 28.92 41.99 24346j 8.46 15.88 1.09 4.00 100.36 4 24348f 29.77 1.97 49.18 18.61 0.42 99.95 5 29.32 2.02 48.83 0.37 99.37 24348g 18.83 _ 6 24348e 28.95 3.42 43.76 4.0820.29 100.49 _ 7 243480 25.20 1.78 42.16 6.70 13.61 0.42 8.79 1.92 100.59 8 24617j 28.63 3.06 40.88 6.17 17.46 0.64 1.43 2.13 100.00 _ 9 1.25 24617k 26.72 2.58 38.94 6.01 13.84 1.15 1.85 6.99 99.35 10 246171 28.35 2.68 40.78 5.97 16.88 0.45 0.58 3.59 99.28 _ Кристаллохимическая формула 24346k $(Cu_{10.03}Ag_{0.10})_{\Sigma 10.13}(Zn_{1.74}Fe_{0.08})_{\Sigma 1.83}(As_{3.55}Sb_{0.42})_{\Sigma 3.98}S_{13.00}$ 1 2 243461 $(Cu_{9.66}Ag_{0.06})_{\Sigma 9.72}(Zn_{1.69}Fe_{0.08})_{\Sigma 1.76}(As_{3.57}Sb_{0.33})_{\Sigma 3.90}S_{13.00}$ 3 24346j $(Cu_{9.52}Ag_{0.14})_{\Sigma 9.67}Zn_{1.86}(As_{3.05}Sb_{0.47})_{\Sigma 3.52}S_{13.00}$ 4 24348f $Cu_{10.83}Fe_{0.49}(As_{3.47}Sb_{0.04})_{\Sigma_{3.52}}S_{13.00}$ 5 24348g $Cu_{10.92}Fe_{0.51}(As_{3.57}Sb_{0.04})_{\Sigma 3.61}S_{13.00}$ 6 24348e $Cu_{9.91}(Zn_{0.89}Fe_{0.88})_{\Sigma^{1.78}}As_{3.89}S_{13.00}$ 7 243480 $Cu_{10.97}(Zn_{1.69}Fe_{0.52})_{\Sigma 2.22}(As_{3.00}Sb_{1.19}Bi_{0.15})_{\Sigma 4.34}S_{13.00}$ $(Cu_{9.36}Ag_{0.08})_{\Sigma 9.45}(Zn_{1.37}Fe_{0.79}Pb_{0.10})_{\Sigma 2.27}(As_{3.38}Bi_{0.14})_{\Sigma 3.54}S_{13.00}$ 8 24617j 9 24617k $(Cu_{9.55}Ag_{0.18})_{\Sigma 9.73}(Zn_{1.43}Fe_{0.72}Pb_{0.13})_{\Sigma 2.29}(As_{2.87}Bi_{0.52}Sb_{0.14})_{\Sigma 3.54}S_{13.00}$ 10 246171 $(Cu_{9.43}Ag_{0.06})_{\Sigma 9.50}(Zn_{1.34}Fe_{0.71})_{\Sigma 2.04}(As_{3.31}Bi_{0.25}Sb_{0.07})_{\Sigma 3.63}S_{13.00}$

Chemical composition of tennantite in galena-sphalerite (1-3) and sphalerite-pyrite-chalcopyrite (4-10) veins
of the southern flank of the Saf'yanovka deposit, wt %

Примечание: прочерк – элемент не обнаружен. Формулы рассчитаны на S = 13.

Note: The dash – element is not detected. The formulas are calculated for S = 13.

В его составе отмечается небольшой дефицит Cu, а также избыток Zn и Fe. Единственное угловатое зерно касситерита размером 2 мкм установлено также на границе между халькопиритом и пиритом. На ЭД спектре касситерита присутствуют пики Ga и Cu (рис. 7а).

Сакураиит (?) обнаружен в виде трех включений размером до 2–3 мкм в пирите (рис. 7б). Гессит образует зерна со сглаженными контурами размером до 4–5 мкм, которые находятся в пирите и в одном случае срастается с фазой Bi-Te-Ag-Se, (рис. 7в). В других случаях гессит встречается вместе с пиритом в доломите. Кроме фазы Bi-Te-Ag-Se, в пирите также были обнаружены мелкие (до 2–3 мкм) включения соединений Bi и S, Bi, Pb и S (рис. 6а, рис. 7г). Достоверной находкой среди Biсодержащих минералов является виттихенит с размером зерен около 10 мкм, который присутствует на границе между пиритом и кварцем (рис. 6е). Химический состав минерала (мас. %): 40.33 Cu, 38.95 Bi, 1.20 Ag, 19.52 S, сумма 100.00. Формула минерала (расчет на сумму катионов и анионов, равную 7): $Cu_{3.08}Bi_{0.91}Ag_{0.05}S_{2.96}.$

Флюоритовые жилы. Флюорит образует срастания с доломитом, каолинитом, магнезиокарфолитом, мусковитом, хлоритом и кварцем (рис. 8). По результатам СЭМ-ЭДС анализа максимальное содержание Y_2O_3 во флюорите составляет 0.34 мас. %, в доломите – 0.33 мас. %.

Во флюоритовых жилах обнаружены пирит, сфалерит, рутил, синхизит-(Nd), синхизит-(Y), синхизит-(Ce), бастнезит, монацит-(Ce) и фторапатит. Наибольшее количество включений синхизита-(Nd) связано с доломитом, который образует ветвистые прожилки во флюорите мощностью до 100 мкм (рис. 8а). Редко встречаются срастания синхизита-(Ce) и синхизита-(Y). Включения синхизита-(Nd) и бастнезита также обнаружены в каолините (рис. 8ж, 3).

Минералы группы синхизита обычно образует редкие удлиненные кристаллы размером от 10 до 25 мкм с однородным внутренним строениСафина Н.П., Коровко А.В., Блинов И.А., Анкушева Н.Н., Рассомахин М.А., Филиппова К.А. Safina N.P., Korovko A.V., Blinov I.A., Ankusheva N.N., Rassomakhin M.A., Filippova K.A.



Рис. 6. Акцессорная минерализация в сфалерит-галенитовых (а, б) и пирит-халькопиритовых (в-е) жилах: а – срастание пирита (ру), блеклой руды (fhl) с включением фазы Bi-S и доломита (dol); б – пирит с включениями станноидита (stn) в ассоциации с халькопиритом (chp), игольчатым халькозином (cc), халькопиритом и гипсом (gps); в – ассоциация халькопирита и халькозина: зернистые агрегаты халькозина замещаются халькопиритом (слева) и игольчатые кристаллы халькопирита с реликтами халькозина в гипсе (справа); г, д – включения станноидита в халькопирите (г) и пирите (д); е – зерна виттихенита (wtc) в ассоциации с кварцем (qtz) между кристаллами пирита.

Fig. 6. Accessory mineralization in sphalerite-galena (a, δ) and pyrite-chalcopyrite (B-e) veins: a – pyrite intergrowth (py) with fahlore (fhl) and inclusions of the Bi-S phase and dolomite (dol); δ – pyrite with stannoidite inclusions (stn) associated with chalcopyrite (chp), acicular chalcocite (cc), chalcopyrite and gypsum (gps); B – assemblage of chalcopyrite and chalcocite: granular aggregates of chalcocite replaced by chalcopyrite (left) and acicular chalcopyrite crystals with chalcocite relics in gypsum (right); r, μ – stannoidite inclusions in chalcopyrite (r) and pyrite (μ); e – wittichenite (wtc) grains associated with quartz (qtz) between pyrite crystals.

ем (рис. 8б–г). Единственный сросток синхизита-(Y) и синхизита-(Ce) размером до 25 мкм имеет треугольную форму с четкими границами между минералами. В составе синхизита-(Y) установлено 0.59 мас. % ThO₂. Зерна синхизита-(Nd) однородные по составу, содержания элементов в их пределах варьируют незначительно (табл. 5). Бастнезит обнаружен в виде удлиненных зерен размером 3×1 мкм (рис. 83).

Силикаты, представленные кварцем, магнезиокарфолитом и мусковитом, срастаются с каолинитом и доломитом и формируют гнезда во флюорите (рис. 8д, ж, з). В химическом составе магнезиокарфолита отмечается присутствие примеси Са (до 0.33 мас. %) (табл. 6).

В ассоциации с кристаллами пирита, которые располагаются в кварцевой массе, обнаруже-

ны кристаллы фторапатита размером до 30 мкм, а также зерна рутила размером до 40 мкм с концентрически-зональным строением (рис. 8и). Состав фторапатита (мас. %) F (1.75), Cl (0.26), Sr (1.21) и Fe (0.99). В составе рутила установлено 0.47 мас. % ZrO₂.

Физико-химические условия образования жил. Для термометрических исследований использовались одиночные первичные двухфазные флюидные включения, равномерно распределенные по объему зерен флюорита и гипса (рис. 9). Также установлены однофазные газовые и водные включения размером до 5 мкм, сингенетичные двухфазным первичным и псевдовторичным включениям. Проанализированные включения имеют размер 10–20 мкм, изометричную форму, с элементами кристаллографических граней, расположены одиМинералогические особенности и условия образования жильной минерализации Сафьяновского месторождения Mineralogical features and formation conditions of vein mineralization of the Saf'yanovka massive sulfide deposit



Рис. 7. Акцессорные минералы сфалерит-пирит-халькопиритовых жил и их энергодисперсионные спектры: а – включение касситерита (cst) с примесью Ga в пирите (py); б – включения сакураиита (sak) и галенита (gn) и прожилки гипса (gps) в пирите; в – включение гессита (hes) и фазы Bi-Te-Ag-Se в пирите; г – включения фазы Bi-Pb-S в пирите с прожилками халькопирита (chp).

Fig. 7. Accessory minerals of sphalerite-pyrite-chalcopyrite veins and their energy-dispersive spectra: a - Ga-bearing cassiterite inclusion (cst) in pyrite (py); δ – sakuraiite (sak) and galena (gn) inclusions and gypsum veins (gps) in pyrite; B – inclusion of hessite (hes) and a Bi-Te-Ag-Se phase in pyrite; Γ – inclusions of a Bi-Pb-S phase in pyrite with chalcopyrite vein (chp).

Химический состав синхизита-(Nd), мас. %

Таблица 5 Table 5

	Chemical composition of synchysite-(Nd), wt. %											14010 5		
№ <i>ан</i> .	F	CaO	Y ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Ce_2O_3	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃	CO ₂	H ₂ O	F	Сумма
1	4.09	17.92	4.98	4.05	11.50	2.35	13.59	4.46	7.91	1.28	27.76	0.90	1.72	99.07
2	6.05	18.46	5.09	3.01	11.87	2.93	16.22	4.21	5.69	0.73	28.11	—	2.55	99.82
3	4.87	18.16	2.03	3.19	12.51	3.16	17.92	5.29	5.66	0.65	27.65	0.51	2.05	99.55
4	4.34	18.02	7.02	2.74	10.52	2.32	15.02	4.47	7.06	0.96	28.05	0.81	1.83	99.50
5	3.71	18.08	7.30	3.69	9.30	1.47	13.41	5.27	8.70	1.30	28.15	1.12	1.56	99.94
6	3.94	18.17	6.04	3.03	10.39	2.75	15.58	5.40	6.16	1.09	28.13	1.00	1.66	100.02
7	3.42	17.29	5.56	3.14	10.12	2.83	16.07	5.04	7.41	1.22	27.61	1.20	1.44	99.47
8	4.12	17.81	6.99	2.72	10.45	2.30	14.92	4.44	7.01	0.95	27.77	0.88	1.73	98.63
					Кj	ристалло	охимиче	еская фо	рмула					
1	Ca _{1.01} (1	$Nd_{0.26}Ce_0$	22Gd _{0.14} Y	0.14La0.08	m _{0.08} Pr _{0.05}	$Dy_{0.02})_{\Sigma^{1.02}}$	$[CO_3]_{2.00}$	(F _{0.68} OH _{0.5}	32) ∑1.00					
2	Ca _{1.03} (1	$Nd_{0.30}Ce_0$	23Y0.14GC	$l_{0.10}Sm_{0.08}$	$La_{0.06}Pr_{0.06}$	$Dy_{0.01})_{\Sigma 0.98}$	$[CO_3]_{2.00}$	F _{1.00}						
3	Ca _{1.03} (1	$Nd_{0.34}Ce_0$	24Gd _{0.10} S	m _{0.10} Y _{0.06}	$La_{0.06}Pr_{0.06}$	Dy _{0.01}) _{∑0.97}	7[CO ₃] _{2.00}	(F _{0.82} OH _{0.3}	18)∑1.00					
4	Ca _{1.03} (1	$Nd_{0.28}Ce_0$	20Y0.20GC	$l_{0.12}Sm_{0.08}$	$La_{0.05}Pr_{0.04}$	Dy _{0.02}) _{∑0.99}	$[CO_3]_{2.00}$	(F _{0.72} OH _{0.2}	28) _{∑1.00}					
5	$5 Ca_{1.01}(Nd_{0.25}Y_{0.20}Ce_{0.18}Gd_{0.15}Sm_{0.09}La_{0.07}Pr_{0.03}Dy_{0.02})_{\Sigma 0.99}[CO_3]_{2.00}(F_{0.61}OH_{0.39})_{\Sigma 1.00}$													
6	Ca _{1.01} (1	$Nd_{0.29}Ce_0$	20Y0.17GC	$l_{0.11}Sm_{0.10}$	La _{0.06} Pr _{0.05}	$Dy_{0.02})_{\Sigma^{1.00}}$	$[CO_3]_{2.00}$	(F _{0.66} OH _{0.3}	35)∑1.00					
7	Ca _{0.98} (1	$Nd_{0.30}Ce_0$	20Y0.16G	$l_{0.11}Sm_{0.09}$	La _{0.06} Pr _{0.05}	Dy _{0.02}) _{∑0.99}	$[CO_3]_{2.00}$	(F _{0.57} OH _{0.4}	43)∑1.00					
8	8 $Ca_{1.01}(Nd_{0.28}Ce_{0.20}Y_{0.20}Gd_{0.12}Sm_{0.08}La_{0.05}Pr_{0.04}Dy_{0.20})_{50.99}[CO_3]_{2.00}(F_{0.69}OH_{0.31})_{51.00}$													

Примечание. Прочерк – не обнаружено. Содержание СО₂ и H₂O рассчитано по стехиометрии. Формулы рассчитаны на сумму катионов, равную двум.

Note. Dash - not detected. The CO₂ and H₂O content is recalculated by stoichiometry. The formulas are recalculated to cation sum of 2.

Сафина Н.П., Коровко А.В., Блинов И.А., Анкушева Н.Н., Рассомахин М.А., Филиппова К.А. Safina N.P., Korovko A.V., Blinov I.A., Ankusheva N.N., Rassomakhin M.A., Filippova K.A.



Рис. 8. Акцессорная минерализация в составе флюоритовых жил: а, б – прожилки доломита (dol) и кальцита (cal) во флюорите (flu) с включениями синхизита-(Nd) (synch-Nd) (б); в – многочисленные включения синхизита-(Nd) в доломите; г – пластинчатый кристалл синхизита-(Nd) в доломите; д – срастания магнезиокарфолита (mcar), доломита и каолинита (kln) во флюорите; е – включения синхизита-(Nd) в кайме из доломита и кальцита на границе между каолинитом и флюоритом; ж – включения синхизита-(Nd) и кварца (qtz) в каолините; з – удлиненные включения бастнезита (bn) в каолините; и – сростки пирита (py) с включениями галенита (gn) в ассоциации с рутилом (rut) и фторапатитом (ар).

Fig. 8. Accessory mineralization in fluorite veins: a, 6 - dolomite (dol) and calcite (cal) veinlets in fluorite (flu) with synchysite-(Nd) inclusions (synch-Nd) (b); B - numerous synchysite-(Nd) inclusions in dolomite; r - platy synchysite-(Nd) crystal in dolomite; $\pi -$ intergrowths of magnesiocarpholite (mcar), dolomite and kaolinite (kln) in fluorite; e - synchysite-(Nd) inclusions in the dolomite and calcite rim at the kaolinite–fluorite boundary; $\pi -$ synchysite-(Nd) and quartz (qtz) inclusions in kaolinite; 3 - elongated bastnäsite inclusions (bn) in kaolinite; $\mu -$ pyrite (py) intergrowths with galena (gn) inclusions associated with rutile (rut) and fluorapatite (ap).

ночно, редко группами. Согласно критериям (Реддер, 1978, Kerkhof, Hein, 2001), такие включения отнесены к первичным и псевдовторичным. Первичные включения удалены от залеченных трещин и шлейфов вторичных включений. Псевдовторичные включения тяготеют к трещинам в минералехозяине, образовавшимся в процессе его отложения и не выходящим за пределы зерен. Во флюидных включениях во флюорите газовая фаза занимает до 15–20 % объема вакуолей (рис. 9а). Согласно температурам эвтектики, варьирующим от -26 до -35 °C, включения содержат флюиды с хлоридами Na, K, Ca и Mg (табл. 7). Согласно (Spenser et al., 1990), температуры эвтектики, равные или близкие -26 °C, указывают на присутствие во флюиде хлоридов Ca. Соленость флюидов, рассчитанная по температурам плавления последних

Состав магнезиокарфолита, мас. %

Composition of the magnesiocarpholite, wt %

Таблица б

Table 6

			-		0	•	<i>,</i>			
№ ан.	№ лаб.	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	FeO	Сумма*	OH	Сумма
1	24074n	-	13.88	34.02	36.84	0.22	0.41	85.38	13.16	98.54
2	24074p	0.30	13.84	34.14	37.79	-	0.48	86.54	12.99	99.54
3	24074i	_	13.51	33.66	37.07	0.33	0.50	85.08	13.21	98.29
Кристаллохимическая формула										
1	1 24074n $(Mg_{1.07}Fe_{0.02}Ca_{0.01})_{\Sigma_{1.10}}(Al_{2.07}Si_{1.90})O_6(OH)_4$									
2	24074p	$(Mg_{1.05}Fe_{0.02}Na_{0.01})_{\Sigma_{1.08}}(Al_{2.05}Si_{1.93})O_6(OH)_4$								
3	24074i		$(Mg_1 a_F E_{0.02} C_{0.02}) \times (a_F C_{0.02} C_{0.02}) \times (a_F C_{0.02}) \times (a_F C_{0.02}) \times (a_F C_{0.02}) \times (a_F C_{0.02$							

Примечание: * – сумма без учета воды. Формула рассчитана по зарядам на 16 анионов, ОН – с нормализацией на

4 ф.е. Прочерк – элемент не обнаружен.

Note:^{*} – the amount excluding H_2O . The formula is calculated by charges for 16 anions, OH is normalized by 4 apfu. The dash – element is not detected.

Таблица 7

Результаты термобарогеохимических исследований гипса и флюорита южного фланга Сафьяновского месторождения

Table 7

Fluid inclusions data in gypsum and fluorite of the southern flank of the Saf'yanovka deposit

№ п/п	№ обр./ минерал	n	Т _э , °С, солевой состав	Т _{пл льда} , °С	С, мас. % NaCl-экв.	Т₁₀м, °С	T _{ист} , °C
1	Саф 23-1 (флюорит)	30	–26–35 (хлориды Na, K, Ca, Mg)	-57.8	7.9–11.5	185–270	195–280
2	Саф 23-2 (гипс)	30	-2021 (хлориды и сульфаты Na)	-2.5 4.5	4.2–7.2	140–200	150–210

Примечание. Т_э – температура эвтектики; Т_{пл льда} – температура плавления последнего кристаллика льда; С – концентрация солей; Т_{гом} – температура гомогенизации; n – число измерений. Т_{ист} – температура гомогенизации с поправкой на давление (+10 °C) (Potter, 1977).

Note. T_{2} – eutectic temperature; $T_{III, TIB,ZR}$ – ice melting temperature; C – salinity; T_{IOM} – homogenization temperature; n – number of analyses; T_{HCT} – homogenization temperature corrected for pressure (+10 °C) (Potter, 1977).

кристаллических фаз, варьирует от 7.9 до 11.5 мас. %, NaCl-экв (табл. 7). Включения гомогенизировались в жидкую фазу, интервал температур гомогенизации составляет 185–270 °C.

Для гипса характерны флюидные включения с газовой фазой, занимающей до 10–15 % объема. Включения расположены строго ориентированно и имеют четкие кристаллографические очертания (рис. 9б). Согласно температурам эвтектики от –20 до –21 °C), флюид, захваченный включениями, со-держит хлориды и сульфаты Na. Соленость флюида составляет 4.2–7.2 мас. % NaCl-экв (табл. 7). Температуры гомогенизации в жидкую фазу составили 140–200 °C.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Минералогические особенности жил. Для богатых медных руд на южном фланге Сафьяновского месторождения характерно наличие сульфостаннатов, таких как станноидит и сакураиит (?). Ассоциация станноидита с другими Snсодержащими минералами (станнин, моусонит) типична для борнитовых руд Сафьяновского, Дегтярского, Гайского, Узельгинского и Молодежного колчеданных месторождений на Урале и Урупского - на Кавказе (Качаловская и др., 1973; Колотов Гмыря, 1990; Молошаг и др., 2005; Зайков, 2006; Maslennikov et al., 2019). Как правило, борнитовые руды распространены в кровле или зонах выклинивания колчеданных залежей. Станноидит сра-





стается с борнитом и халькопиритом или замещает халькопирит и сам замещается моусонитом. Известны также структуры распада твердого раствора на станноидит и станнин, обнаруженные в сульфидных жилах Ад-месторождения Икуно в Японии (Kato, Fujiki, 1969). Сакураиит установлен также в гидротермальных жилах Ад-месторождения Икуно и рудах Правоурмийского месторождения олова (Хабаровский край) (Kato, 1969; Shimizu et al., 1986; Alekseev, Marin, 2014). Этот минерал обнаружен в ассоциации со сфалеритом, халькопиритом, станнином, моусонитом и станноидитом.

В изученных жилах Сафьяновского месторождения также обнаружен касситерит, который является распространенным акцессорным минералом в гнездах флюорита в колломорфных пиритовых рудах Сафьяновского месторождения (Сафина и др., 2021).

Находки виттехинита в ассоциации с пиритом и халькопиритом известны на Сафьяновском месторождении, а также в полосчатых борнит-халькопиритовых рудах Валенторского колчеданного месторождения на Среднем Урале (Викентьев, 2009; Maslennikov et al., 2019). Виттихенит встречается в рудах меденосных формаций Забайкальского края, Казахстана и Африки (Трубачев и др., 2019). Он чаще всего срастается с борнитом и халькозином, нередко в кварц-кальцитовых прожилках образует более крупные гнезда и просечки. Виттихенит также является типичным минералом, который встречается в золоторудных месторождениях. Например, он обнаружен на крупнейших золоторудных месторождениях Урала – Березовском и Воронцовском (Vikenteva, Vikentev, 2016).

На Сафьяновском месторождении станноидит, сакураиит и виттехинит, установлены в прожилково-вкрапленных сфалерит-пирит-халькопиритовых рудах, содержащих борнит и халькозин. Взаимоотношения между пиритом, халькозином и халькопиритом, которые, наряду с гипсом, заполняют пустоты в руде, указывают на их близко одновременное отложение и гипогенное происхождение халькозина и борнита.

Еще одной новой находкой для руд Сафьяновского месторождения является присутствие магнезиокарфолита в ассоциации с флюоритом и доломитом. Минералы группы карфолита широко распространены в осадочных породах, которые были изменены в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма (Theye et al., 1992). Карфолит также известен в грейзенах, где он встречается в жилах вместе с флюоритом, монацитом, касситеритом и кварцем (Чистякова, 1974). Редкий магнезиокарфолит обнаружен в колчеданных рудопроявлениях Западной Австралии в ассоциации с хлоритом и мусковитом (Hassan, 2017).

Минералы РЗЭ в изученных жилах. В сфалерит-галенитовых жилах высокие концентрации РЗЭ+Y, U и Th связаны с включениями монацита-(Се) и фторапатита в доломите и кварце. Флюоритовые жилы выделяются еще более высокими суммарными концентрациями РЗЭ и Y, а также повышенными – Th и U. Высокие содержания РЗЭ обусловлены присутствием фторкарбонатов в доломите и каолините.

В целом, фосфаты РЗЭ часто встречаются на колчеданных месторождениях, однако находки фторкарбонатов РЗЭ редки. На данный момент известны находки синхизита-(Y), синхизита-(Се), бастнезита и паризита на Талганском и Сафьяновском колчеданных месторождениях Урала (Аюпова и др., 2019; Сорока и др., 2023). Синхизит-(Се)

и синхизит-(Y) были обнаружены в ассоциации с флюоритом и карбонатами (кальцит и смитсонит) в рудах Гайского и Александринского колчеданных месторождений Южного Урала (рис. 10). В результате данной работы был найден синхизит-(Nd). Синхизит-(Nd) является характерным аутигенным минералом осадочных пород и бокситов, а также встречается в пегматитах и метасоматиtax (Andersen, 1986; Deady et al., 2014; Palenzona, Martinelli, 2009; Ерохин и др., 2021). Наиболее вероятным источником РЗЭ для формирования синхизита и бастнезита на Сафьяновском месторождении, а также синхизита на Гайском и Александринском, является флюорит. В свою очередь, источниками РЗЭ для флюорита могут служить плагиоклаз кислых рудовмещающих пород месторождения, который растворяется в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма с высвобождением РЗЭ из кристаллической решетки (Yang et al., 2016), а также акцессорный фторапатит, который растворялся при взаимодействии пород с гидротермальными флюидами (Sanchez et al., 2010).

В изученных жилах присутствие различных минеральных форм РЗЭ (фосфаты, фториды, фторкарбонаты) отражается на спектрах РЗЭ и объясняется селективным концентрированием той или иной группы лантаноидов (Винокуров, 2018). Накопление ЛРЗЭ связано с монацитом-(Се) и, возможно, фторапатитом, ЛРЗЭ + СРЗЭ – с флюоритом и фторкарбонатами. Присутствие в составе флюоритовых жил фосфатов, фторидов и фтокарбонатов приводило к контрастному изменению типа распределения РЗЭ от отрицательного субхондритового до положительного параболического.

Условия формирования жил. Результаты изучения флюидных включений в гипсе из пиритхалькопиритовых жил со станноидитом, сакураиитом, виттехинитом показывают, что гипс и ассоциирующая с ним минерализация отлагалась из водного Na-К хлоридного флюида при снижении температуры до 210-150 °С. Ранее полученные данные (Молошаг и др., 2005), свидетельствуют о том, что формирование борнитовых руд с блеклой рудой, станноидитом, моусонитом, колуситом и германитом в пределах Главной рудной залежи Сафьяновского месторождения происходило при сходных температурах - 150-300 °С. С приведенными температурами согласуется образование виттихенита, устойчивого в борнит-халькопирит-халькозиновой ассоциации при температуре 200 °С (Oen, Kieft, 1976).

Для флюорита температуры минералообразования составляли 195-280 °С. Эти температуры сопоставимы с установленными для флюорита из прожилково-вкрапленных халькопирит-сфалеритовых руд ($T_{rom} = 220-260$ °C) и метасоматитов ($T_{rom} =$ 200-230 °C) южного фланга Сафьяновского месторождения, а также флюорита Гайского месторождения (T_{гом} = 200–240 °C) (Сафина и др., 2021). Наши данные также согласуются с температурами, полученными для барит-сульфидных внутрирудных жил (T_{гом} = 160–240 °C) в северной части месторождения (Сафина и др., 2012). Подобные температуры образования (менее 260 °C) получены для карбонатных жил в околорудных породах и хлорит-кварцевых метасоматитов (менее 200-250 °C) южного фланга Сафьяновского месторождения (Грабежев, 2004; Притчин и др., 2014). Все вышеперечисленные интервалы температур не противоречат установленным температурам минералообразующих флюидов (от 104 до 337 °C) для руд этого месторождения и свидетельствуют о низкой степени метаморфизма месторождения (Викентьев, 2012).

Формирование флюорита происходило из флюидов с повышенной температурой и соленостью (7.9–11.5 мас. % NaCl-экв.) относительно гипса в сфалерит-пирит-халькопиритовых жилах (4.2–7.2 мас. % NaCl-экв.). Это отражает эволюцию состава флюидов при формировании различных по минеральному составу жил. В целом, значения и вариации содержания солей в растворах совпадают с ранее установленными для жил флюорита в рудах и породах на южном фланге месторождения, что свидетельствует о близости условий формирования и источнике элементов (Сафина и др., 2021).

Сопоставление минералогических и микротермометрических данных с аналогичными данными по рудам и околорудным метасоматитам в пределах Главной рудной залежи Сафьяновского месторождения свидетельствуют о единстве условий формирования как северной части залежи, так и ее южного фланга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты детального изучения минерального состава сульфидных и флюоритовых жил, залегающих во вмещающих породах южного фланга Сафьяновского медноколчеданного месторождения, позволили объяснить аномальные и повышенные концентрации рудных элементов, таких как Cu, Zn, Pb, Ag, Sn, In, Se, Te и Bi, а также редкоземельных Сафина Н.П., Коровко А.В., Блинов И.А., Анкушева Н.Н., Рассомахин М.А., Филиппова К.А. Safina N.P., Korovko A.V., Blinov I.A., Ankusheva N.N., Rassomakhin M.A., Filippova K.A.



Рис. 10. Включения синхизита в карбонатах ассоциации с флюоритом на Гайском (а-б) и Александринском (в-г) колчеданных месторождениях.

a – зерно кальцита (cal) во флюорите (flu); б – синхизит-(Y) (synch-Y) в кальците; в – округлое включение синхизита-(Ce) (synch-Ce) в смитсоните (smt), который замещает флюорит; г – включения синхизита-(Y) и синхизита-(Ce) и кальцита в смитсоните. BSE – фото.

Fig. 10. Inclusions of synchysite in carbonates associated with fluorite at the Gay (a–6) and Aleksandrinka (B–r) VMS deposits.

a – calcite grain (cal) in fluorite (flu); δ – synchysite-(Y) (synch-Y) in calcite; B – rounded inclusion of synchysite-(Ce) (synch-Ce) in smithsonite (smt), which replaced fluorite; Γ – inclusions of synchisite-(Y) and synchisite-(Ce) and calcite in smithsonite. BSE-images.

элементов в этих рудах. В минеральном составе сфалерит-пирит-халькопиритовых и сфалерит-галенитовых жил установлено присутствие теннантита-(Zn) с примесями Ag, Bi и Pb, энаргита, станноидита, сакураиита (?), виттихенита с примесью Ад, гессита, галенита с примесью Se, минеральных фаз составов Bi-Pb-S, Bi-S и Bi-Te-Ag-Se, монацита-(Се), касситерита и рутила. Среди нерудных минералов в сульфидных жилах обнаружены карбонаты, каолинит, магнезиокарфолит, мусковит, кварц, барит и гипс. Во флюоритовых жилах установлены фторкарбонаты РЗЭ, такие как синхизит-(Nd) (преобладает), синхизит-(Ү), синхизит-(Се), бастнезит, а также монацит-(Се) и фторапатит. Эти минералы находятся в тесной пространственной связи с доломитом и каолинитом, которые наложены на флюорит. На основании изучения флюидных включений в гипсе из пирит-халькопиритовых жил установлено, что гипс и ассоциирующая медная минерализация отлагалась из водного Na-K хлоридного флюида при снижении температуры до 210–150 °C. В составе флюида, участвовавшего в образовании флюоритовых жил, отмечается присутствие хлоридов Na, K, Ca и Mg. Формирование флюорита происходило из флюидов с повышенной температурой (190– 280 °C) и соленостью (7.9–11.5 мас. % NaCl-экв.), что отражает эволюцию состава флюидов при формировании различных по минеральному составу жил на южном фланге месторождения.

ЛИТЕРАТУРА

Аюпова Н.Р., Масленников В.В., Артемьев Д.А., Блинов И.А. (2019) Минералого-геохимические особенности конкреций пирита из сульфидных турбидитов Талганского медно-цинково-колчеданного месторождения (Южный Урал). Литология и полезные ископаемые, 6, 518–539. https://doi.org/10.31857/S0024-497X20196518-539 Борисенко А.С. (1982) Анализ солевого состава растворов газово-жидких включений в минералах методом криометрии / Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений. Москва, Недра, 37–47.

Викентьев И.В. (2009) Новое в минералогии колчеданных месторождений Урала. Вестник РУДН, серия Инженерные исследования, 1, 17–22.

Викентьев И.В. (2012) Параметры гидротермальных флюидов для недеформированных колчеданных месторождений Урала. *Минералогический сборник*, 62(2), 47–58.

Винокуров С.Ф. (2018) Кристаллохимический эффект разделения РЗЭ в минералах: причины и практические следствия. Доклады Академии наук, 479(2), 183–186. https://doi.org/10.7868/S0869565218080157

Грабежев А.И. (2004) Подрудные метасоматиты цинк-медно-колчеданных месторождений Урала (на примере Гайского и Сафьяновского месторождений). *Литосфера*, 4, 76–88.

Ерохин Ю.В., Иванов К.С., Захаров А.В., Хиллер В.В. (2021) Акцессорная и рудная минерализация сланцев из фундамента полуострова Ямао (Западно-Яротинский участок, Западная Сибирь). Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки, 2, 49–55. https://doi.org/10.18522/1026-2237-2021-2-49-55

Зайков В.В. (2006) Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин. Москва, Наука, 429 с.

Качаловская В.М., Осипов Б.С., Кукоев В.А., Козлова Е.В., Басова Г.В. (1973) Моусонит и станноидит из борнитовых руд месторождения Уруп / Минералы и парагенезисы минералов рудных месторождений. Ленинград, Наука, 68–73.

Колотов С.В., Гмыра В.Г. (1990) Редкие минералы Молодежного медноколчеданного месторождения. *Ежегодник-1989*. Свердловск, ИГГ УрО АН СССР, 80–82.

Коровко А.В., Грабежев А.И., Двоеглазов Д.А. (1988) Метасоматический ореол Сафьяновского цинково-медного месторождения (Средний Урал). Доклады Академии наук СССР, 303(3), 692–695.

Коровко А.В., Двоеглазов Д.А. (1991) О позиции Сафьяновского рудного поля в структурах Режевской структурно-формационной зоны (Средний Урал) / Геодинамика и металлогения Урала. Свердловск, УрО АН СССР, 151–152.

Коровко А.В., Двоеглазов Д.А., Пуртов В.А. (1992) О геологической позиции и строении Сафьяновского рудного поля / Новые данные по стратиграфии и литологии палеозоя Урала и Средней Азии. Екатеринбург, Наука, 138–153.

Коровко А.В., Иванов К.С., Пучков В.Н., Бороздина Г.Н., Погромская О.Э. (2017) О возрасте колчеданного оруденения Сафьяновского месторождения (Средний Урал). Материалы Всероссийской конференции «Тектонические, магматические, метаморфические факторы формирования и размещения месторождений рудных

МИНЕРАЛОГИЯ/MINERALOGY **10**(4) 2024

и нерудных полезных ископаемых (XVII Чтения памяти акад. А.Н. Заварицкого)». Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 61–63.

Коровко А.В., Пуртов В.А., Бурнатная Л.Н. и др. (2004ф) Отчет по поисковым работам по оценке промышленной значимости Каменско-Сафьяновской меднорудной зоны Восточно-Уральского прогиба. Отчет Исетской ГСП за 2001-2004 годы. Верхняя Пышма.

Коротеев В.А., Язева Р.Г., Бочкарев В.В., Молошаг В.П., Коровко А.В., Шереметьев Ю.С. (1997) Геологическое положение и состав сульфидных руд Сафьяновского месторождения (Средний Урал). Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 49 с.

Масленников В.В. (2006) Литогенез и колчеданообразование. Миасс, ИМин УрО РАН, 348 с.

Молошаг В.П., Викентьев М.В., Гуляева Т.Я., Тесалина С.Г. (2005) Борнитовые руды колчеданных месторождений Урала. *Литосфера*, 3, 99–116.

Мурзин В.В., Варламов Д.А., Ярославцева Н.С., Молошаг В.П. (2010) Минералогия и строение баритсульфидных жил Сафьяновского медноколчеданного месторождения (Средний Урал). Уральский минералогический сборник № 17. Миасс, ИМин УрО РАН, 12–19.

Притчин М.Е., Сорока Е.И., Галахова О.Л., Главатских С.П. (2014) Карбонатная минерализация околорудных пород Сафьяновского медноколчеданного месторождения (Средний Урал). *Ежегодник-2013*. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 163, 332–335.

Прокин В.А., Молошаг В.П., Малюгин В.А. (2003) Зональность Сафьяновского медноколчеданного месторождения. *Ежегодник-2002*. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 294–300.

Пучков В.Н. (1993) Палеоокеанические структуры Урала. *Геотектоника*, 3, 18–34.

Рёддер Э. (1978) Флюидные включения в минералах. Москва, Мир, 360 с.

Сафина Н.П., Масленников В.В. (2009) Рудокластиты колчеданных месторождений Яман-Касы и Сафьяновское. Миасс, ИМин УрО РАН, 260 с.

Сафина Н.П., Анкушева Н.Н., Мурзин В.В. (2012) Физико-химические условия формирования барита из рудных фаций Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения, Средний Урал. *Литосфера*, 3, 110–126.

Сафина Н.П., Сорока Е.И., Анкушева Н.Н., Киселева Д.В., Блинов И.А., Садыков С.А. (2021) Флюорит в рудах Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения, Средний Урал: ассоциации, состав, генезис. *Геология рудных месторождений*, 63(2), 132–153. https://doi.org/10.31857/S0016777021020052

Сорока Е.И., Притчин М.Е., Лютоев В.П., Смолева И.В. (2019) Физико-химические исследования карбонатов Сафьяновского медно-колчеданного месторождения (Средний Урал). Вестник Пермского университета, 18 (2), 152–164. Сорока Е.И., Притчин М.Е., Леонова Л.В., Булатов В.А. (2023) Редкоземельные фторкарбонаты в породах Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения (Средний Урал). Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 508(1), 50–57. https://doi. org/10.31857/S2686739722600552

Трубачев А.И., Корольков А.Т., Радомская Т.А. (2019) Парагенезисы минералов и формы их выделения – как отражение этапов формирования месторождений медистых песчаников и сланцев. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 330(9), 70–89. https://doi.org/10.18799/24131830/201 9/9/2257

Тучина М.В., Ермакова Ю.В. (2019) Обеспеченность запасами медьдобывающих предприятий Южного и Северного Урала, состояние и перспективы развития их сырьевой базы. *Руды и металлы*, 3, 12–21. https://doi. org/10.24411/0869-5997-2019-10019

Чистякова М.Б. (1974) Минералогия и генетические особенности хрусталеносных пегматитов Кента. *Новые данные о минералах,* 23, 113–173.

Язева Р.Г., Молошаг В.П., Бочкарев В.В. (1991) Геология и рудные парагенезисы Сафьяновского колчеданного месторождения в среднеуральском шарьяже. *Геология рудных месторождений*, 33(4), 47–58.

Alekseev V.I., Marin Yu.B. (2014) Composition and evolution of accessory mineralization of Li–F granites in the Far East as indicators of their ore potential. *Geology* of Ore Deposits, 57(8), 635–644. https://doi.org/10.1134/ S1075701515080024

Andersen T. (1986) Compositional variation of some rare earth minerals from the Fen complex (Telemark, SE Norway): implications for the mobility of rare earths in a carbonatite system. *Mineralogical Magazine*, 50(357), 503–509. https://doi.org/10.1180/minmag.1986.050.357.13

Bodnar R.J., Vityk M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H₂O–NaCl fluid inclusions. In: *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Pontignana-Siena, 117–130.

Davis D.W., Lowenstein T.K., Spenser R.J. (1990) Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂-H₂O and CaCl₂-NaCl-H₂O. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(3), 591–601. https://doi. org/10.1016/0016-7037(90)90355-O

Deady E., Mouchos E., Goodenough K., Williamson B., Wall F. (2014) Rare earth elements in karst-bauxites: untapped European resource? *ERES2014: 1st European Rare Earth Resources Conference*, 1–12.

Hassan L.Y. (2017). Alteration associated with the Austin-Quinns VMS prospects, Northern Yilgarn Craton. Geological Survey of Western Australia, Record 2017/10, 61 p.

Kato A. (1969) Stannoidite, $Cu_5(Fe, Zn)_2SnS_8$, a new stannite-like mineral from the Konjo mine, Okayama Prefecture, Japan. *Bulletin National Science Museum*, 12, 165–172. Kato A., Fujiki Y. (1969) The occurrence of stannoidites from the xenothermal ore deposits of the Akenobe, Ikuno, and Tada Mines, Hyogo Prefecture, and the Fukoku Mine Kyoto Prefecture, Japan. *Mineralogical Journal*, 5(6), 417–433. https://doi.org/10.2465/minerj1953.5.417

Kerkhof A.M, Hein U.F. (2001) Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55, 27–47. https://doi.org/10.1016/ S0024-4937(00)00037-2

Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Safina N.P., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Y., Large R.R., Herrington R.J., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Maslennikova S.P., Tessalina S.G. (2019) Mineralogical features of ore diagenites in the Urals massive sulfide deposits, Russia. *Minerals*, 3(3), 150. https://doi.org/10.3390/min9030150

McDonough W.F., Sun S.-S. (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223–253. https://doi. org/10.1016/0009-2541(94)00140-4

Oen I.S., Kieft C. (1976) Silver-bearing wittichenitechalcopyrite-bornite intergrowths and associated minerals in the Mangualde pegmatite, Portugal. *The Canadian Mineralogist*, 14, 185–193.

Palenzona A., Martinelli A. (2009) Synchysite-(Nd) al Val-lone del Triolet, Courmayeur, Aosta. *Rivista Mineralogica Italiana*, 9, 122–124.

Potter R.W. (1977) Pressure corrections for fluidinclusion homogenization temperatures based on the volumetric properties of the system NaCl–H₂O. USGS Journal of Resources, 5, 603–607.

Sánchez V., Cardellach E., Corbella M., Vindel E., MartínCrespo T., Boyce A.J. (2010) Variability in fluid sources in the fluorite deposits from Asturias (N Spain): Further evidences from REE, radiogenic (Sr, Sm, Nd) and stable (S, C, O) isotope data. Ore Geol. Rev, 37, 87–100. doi. org/10/1016/j.oregeorev.2009.12.001

Shimizu M., Kato A., Shiozawa T. (1986) Sakuraiite: chemical composition and extent of (Zn,Fe)In-for-CuSn substitution. *The Canadian Mineralogist*, 24 (2), 405–409.

Spenser R.J., Moller N., Weare J.N. (1990) The prediction of mineral solubility's in mineral waters: a chemical equilibrium model for the Na-K-Ca-Mg-Cl-SO4 system at temperatures below 25 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(3), 575–590. https://doi. org/10.1016/0016-7037(84)90098-X

Theye T., Seidel E., Vidal O. (1992) Carpholite, sudoite, and chloritoid in low-grade high-pressure metapelites from Crete and the Peloponnese, Greece. *European Journal of Mineralogy*, 4 (3), 487–507. https://doi. rg/10.1127/jm/4/3/0487

Vikent'eva O., Vikentev I. (2016) Occurrence modes of As, Sb, Te, Bi, Ag in sulfide assemblages of gold deposits of the Urals. *3rd International Conference on Competitive Materials and Technology Processes (IC–CMTP3). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 123. https://doi.org/10.1088/1757–899X/123/1/012028

Yang Y., Rusakov V.Yu., Kuz'mina T.G. (2016) Rare earth elements in the ore-bearing sediments of the Krasnov

and Semenov hydrothermal fields, Mid-Atlantic Ridge. *Geochemistry International*, 54 (3), 280–292. https://doi. org/10.1134/S0016702916010110

REFERENCES

Alekseev V.I., Marin Yu.B. (2014) Composition and evolution of accessory mineralization of Li–F granites in the Far East as indicators of their ore potential. *Geology* of Ore Deposits, 57(8), 635–644. https://doi.org/10.1134/ S1075701515080024

Andersen T. (1986) Compositional variation of some rare earth minerals from the Fen complex (Telemark, SE Norway): implications for the mobility of rare earths in a carbonatite system. *Mineralogical Magazine*, 50(357), 503–509. https://doi.org/10.1180/minmag.1986.050.357.13

Ayupova N.R., Maslennikov V.V., Artem'ev D.A., Blinov I.A. (2019). Mineralogical and geochemical features of pyrite nodules from sulfide turbidites in the Talgan Cu-Zn massive sulfide deposit (Southern Urals). *Lithology and Mineral Resources*, 54(6), 447–464. https://doi. org/10.31857/S0024-497X20196518-539

Bodnar R.J., Vityk M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H_2O –NaCl fluid inclusions In: Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Pontignana-Siena, 117–130.

Borisenko A.S. (1982) Analysis of the salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals by cryometric method In: *Fluid inclusions study for the search and study of ore deposits*. Moscow, Nedra Publ., 37–47. (In Russian)

Chistyakova M.B. (1974) Mineralogy and genetic features of crystal-bearing pegmatites of Kent. *Novye dannye o mineralakh (New data on Minerals)*, 23, 113–173. (in Russian)

Davis D.W., Lowenstein T.K., Spenser R.J. (1990) Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂-H₂O and CaCl₂-NaCl-H₂O. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54 (3), 591–601. https://doi. org/10.1016/0016-7037(90)90355-O

Deady E., Mouchos E., Goodenough K., Williamson B., Wall F. (2014) Rare earth elements in karst-bauxites: untapped European resource? *ERES2014: 1st European Rare Earth Resources Conference*, 1–12.

Erokhin Yu.V., Ivanov K.S., Zakharov A.V., Hiller V.V. (2021) Accessory and ore mineralization of schists from the basement of the Yamal Peninsula (Zapadno-Yarotinsky area, Western Siberia). *Izvestiya VUZov. Severo-Kavkazskij region. Estestvenny'e nauki (Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences*), 2, 49–55. (in Russian)

Grabezhev A.I. (2004) Footwall hydrothermally altered rocks of the Uralian zinc-copper-massive deposits (on example of the Gay and Saf'yanovkadeposits). *Litosfera (Lithosphere)*, 4, 76–88. (in Russian)

Hassan L.Y. (2017). Alteration associated with the Austin-Quinns VMS prospects, Northern Yilgarn Craton. Geological Survey of Western Australia, Record 2017/10, 61 p.

Kachalovskaya V.M., Osipov B.S., Kukoev V.A., Kozlova E.V., Basova G.V. (1973) Mawsonite and stannoidite from bornite ores of the Urup deposit. In: *Mineraly i mineral'nye assotsiatsii rudnykh mestorozhdeniy (Minerals and Mineral Assemblages of Ore Deposits)*. Leningrad, Nauka, 68–73. (in Russian)

Kato A. (1969) Stannoidite, Cu₅(Fe, Zn)₂SnS₈, a new stannite-like mineral from the Konjo mine, Okayama Prefecture, Japan. *Bulletin National Science Museum*, 12, 165–172.

KatoA., FujikiY. (1969) The occurrence of stannoidites from the xenothermal ore deposits of the Akenobe, Ikuno, and Tada Mines, Hyogo Prefecfure, and the Fukoku Mine Kyoto Prefecture, Japan. *Mineralogical Journal*, 5 (6), 417– 433. https://doi.org/10.2465/minerj1953.5.417

Kerkhof A.M, Hein U.F. (2001) Fluid inclusion petrography. *Lithos*, 55, 27–47. https://doi.org/10.1016/ S0024-4937(00)00037-2

Kolotov S.V., Gmyra V.G. (1990) Rare minerals of the Molodezhnoe massive sulfide deposit. *Ezhegodnik-1989 (Yearbook-1989)*. Sverdlovsk, IGG UrO AN SSSR, 80–82. (in Russian)

Korovko A.V., Dvoeglazov D.A. (1991) Saf'yanovka ore field in the Rezh lithotectonic zone (Central Urals). In: *Geodinamika i metallogeniya Urala (Geodynamics and Metallogeny of the Urals)*. Sverdlovsk, IGG UrO AN SSSR, 151–152. (in Russian)

Korovko A.V., Dvoeglazov D.A., Purtov V.A. (1992) Geological setting and structure of the Saf'yanovka ore field. In: *Novye dannye po stratigrafii i litologii paleozoya Urala i Tsentral'noy Azii (New Data on Stratigraphy and Lithology of the Paleozoic of the Urals and Central Asia).* Yekaterinburg, Nauka, 138–153. (in Russian)

Korovko A.V., Grabezhev A.I., Dvoeglazov D.A. (1988) Metasomatic halo of the Saf'yanovka Zn-Cu deposit (Central Urals). *Doklady Akademii nauk SSSR (Doklady AS USSR)*, 303 (3), 692–695. (in Russian)

Korovko A.V., Purtov V.A., Burnatnaya L.N. (2004) Unpublished report on prospecting work for assessment of economic significance of the Kamenskaya-Saf'yanovskaya copper ore zone of the East Ural Trough. Report of the Iset GSP of 2001-2004. Verhnya Pyshma. (in Russian)

Korovko A.V., Ivanov K.S., Puchkov V.N., Borozdina G.N., Pogromskaya O.E. (2017) The age of massive sulfide mineralization of the Saf'yanovka deposit (Central Urals). Materialy Vserossiyskoy konferentsii «Tektonicheskie, magmaticheskie, metamorficheskie faktory formirovaniya i razmeshcheniya mestorozhdeniy rudnykh i nerudnykh poleznykh iskopaemykh (XVII chteniya pamyati akad. A.N. Zavaritskogo)» (Proceedings of the All-Russian Conference "Tectonic, Magmatic and Metamorphic Factors of Formation and Occurrence of Ore and Non-Metallic Deposits (XVII Readings in Memory of Academician A.N. Zavaritsky). Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 61–63. (in Russian) Koroteev V.A., Yazeva R.G., Bochkarev V.V., Moloshag V.P., Korovko A.V., Sheremetyev Yu.S. (1997) *Geological setting and composition of the Saf'yanovka sulfide deposit in the Central Urals*. Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 49 p. (in Russian)

Maslennikov V.V. (2006) *Lithogenesis and formation of massive sulfide deposits*. Miass, IMin UrO RAN, 348 p. (in Russian)

Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Safina N.P., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Y., Large R.R., Herrington R.J., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Maslennikova S.P., Tessalina S.G. (2019) Mineralogical features of ore diagenites in the Urals massive sulfide deposits, Russia. *Minerals*, 3(3), 150. https://doi.org/10.3390/min9030150

McDonough W.F., Sun S.-S. (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223–253. https://doi. org/10.1016/0009-2541(94)00140-4

Moloshag V.P., Vikentiev M.V., Gulyaeva T.Ya., Tesalina S.G. (2005) Bornite ores of massive sulfide deposits of the Urals. *Litosfera (Lithosphere)*, 3, 99–116. (in Russian)

Murzin V.V., Varlamov D.A., Yaroslavtseva N.S., Moloshag V.P. (2010) Mineralogy and structure of baritesulfide veins of the Saf'yanovka VHMS deposit, (Central Urals). Ural'skiy mineralogicheskiy sbornik № 17 (Urals Mineralogical Collection № 17). Miass, IMin UrO RAN, 12–19. (in Russian)

Oen I.S., Kieft C. (1976) Silver-bearing wittichenitechalcopyrite-bornite intergrowths and associated minerals in the Mangualde pegmatite, Portugal. *The Canadian Mineralogist*, 14, 185–193.

Palenzona A., Martinelli A. (2009) Synchysite-(Nd) al Val-Ione del Triolet, Courmayeur, Aosta. *Rivista Mineralogica Italiana*, 9, 122–124.

Potter R.W. (1977) Pressure corrections for fluidinclusion homogenization temperatures based on the volumetric properties of the system NaCl–H₂O. *USGS Journal of Resources*, 5, 603–607.

Pritchin M.E., Soroka E.I., Galakhova O.L., Glavatskikh S.P. (2014) Physicochemical study of carbonates of the Saf'yanovka massive sulfide deposit (Central Urals). *Ezhegodnik-2013 (Yearbook-2013).* Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 163, 332–335. (in Russian)

Puchkov V.N. (1993) Paleoceanic structures of the Urals. *Geotektonika (Geotectonics)*, 3, 18–34. (in Russian)

Redder E. (1978) *Fluid inclusions in minerals.* Moscow, Mir, 360 p. (in Russian)

Safina N.P., Maslennikov V.V. (2009) Ore clastites of the Yaman-Kasy and Saf'yanovka massive sulfide deposits. Miass, IMin UrO RAN, 260 p. (in Russian)

Safina N.P., Ankusheva N.N., Murzin V.V. (2012) Physicochemical formation conditions of barite from ore facies of the Saf'yanovka VHMS deposit, Central Ural. *Litosfera (Lithosphere)*, 3, 110–126. (in Russian)

Safina N.P., Soroka E.I., Ankusheva N.N., Kiseleva D.V., Blinov I.A., Sadykov S.A. (2021) Fluorite in ores of the Saf'yanovka massive sulfide deposit, Central Urals: assemblages, composition, and genesis. Geology of Ore Deposits, 63(2), 132–153. DOI: 10.1134/S1075701521020057

Sánchez V., Cardellach E., Corbella M., Vindel E., MartínCrespo T., Boyce A.J. (2010) Variability in fluid sources in the fluorite deposits from Asturias (N Spain): Further evidences from REE, radiogenic (Sr, Sm, Nd) and stable (S, C, O) isotope data. Ore Geol. Rev, 37, 87–100. doi. org/10/1016/j.oregeorev.2009.12.001

Shimizu M., Kato A., Shiozawa T. (1986) Sakuraiite: chemical composition and extent of (Zn,Fe)In-for-CuSn substitution. *The Canadian Mineralogist*, 24(2), 405–409.

Spenser R.J., Moller N., Weare J.N. (1990) The prediction of mineral solubility's in mineral waters: a chemical equilibrium model for the Na-K-Ca-Mg-Cl-SO₄ system at temperatures below 25 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(3), 575–590. https://doi. org/10.1016/0016-7037(84)90098-X

Soroka E.I., Pritchin M.E., Lyutoev V.P., Smoleva I.V. (2019) Physicochemical studies of carbonates of the Saf'yanovka massive sulfide deposit, Central Ural. *Vestnik Permskogo universiteta (Bulletin of the Perm University)*, 18 (2), 152–164. https://doi.org/10.17072/psu.geol.18.2.152

Soroka E.I., Pritchin M.E., Leonova L.V., Bulatov V.A. (2023) Rare-earth fluorocarbonates in rocks of the Saf'yanovka copper-zinc-pyrite deposit (Middle Urals). *Doklady Earth Sciences*, 508(1), 50–57. https://doi. org/10.1134/S1028334X22601146

Theye T., Seidel E., Vidal O. (1992) Carpholite, sudoite, and chloritoid in low-grade high-pressure metapelites from Crete and the Peloponnese, Greece. *European Journal of Mineralogy*, 4(3), 487–507. https://doi.org/10.1127/ejm/4/3/0487

Trubachev A.I., Korolkov A.T., Radomskaya T.A. (2019) Mineral assemblages and mode of occurrence as a reflection of stages of formation of deposits of cupriferous sandstones and shales. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. *Inzhiniring georesursov (Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Asserts Engineering)*, 330 (9), 70–89. (in Russian) https://doi.org/10. 18799/24131830/2019/9/2257

Tuchina M.V., Ermakova Yu.V. (2019) Provision of resources of the South and North Urals copper mines, their mineral base status and prospects. *Rudy i metally* (*Ores and Metals*), 3, 12–21. (in Russian) https://doi. org/10.24411/0869-5997-2019-10019

Vikentiev I.V. (2009) New data on mineralogy of the Urals volcanic massive sulfide deposits. *Vestnik RUDN, seriya Inzhenernye issledovaniya (Bulletin of the RUDN, Engineering Research Series)*, 1, 17–22. (in Russian)

Vikent'eva O., Vikentev I. (2016) Occurrence modes of As, Sb, Te, Bi, Ag in sulfide assemblages of gold deposits of the Urals. *3rd International Conference on Competitive Materials and Technology Processes (IC–CMTP3). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 123. https://doi.org/10.1088/1757–899X/123/1/012028

Минералогические особенности и условия образования жильной минерализации Сафьяновского месторождения 97 Mineralogical features and formation conditions of vein mineralization of the Saf yanovka massive sulfide deposit 97

Vinokurov S.F. (2018) The crystal-chemical effect of REE separation in minerals: causes and practical values. *Doklady Earth Sciences*, 479 (2), 183–186. https://doi. org/10.1134/S1028334X18030236

Yang Y., Rusakov V.Yu., Kuz'mina T.G. (2016) Rare earth elements in the ore-bearing sediments of the Krasnov and Semenov hydrothermal fields, Mid-Atlantic Ridge. *Geochemistry International*, 54(3), 280–292. https://doi. org/10.1134/S0016702916010110 Yazeva R.G., Moloshag V.P., Bochkarev V.V. (1991) Geology and ore assemblages of the Saf'yanovka massive sulfide deposit in the Central Urals overthrust. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy (Geology of Ore Deposits)*, 33(4), 47–58. (in Russian)

Zaykov V.V. (2006) Volcanism and sulfide mounds of the paleoceanic margins: example of massive sulfide zones of the Urals and Siberia. Moscow, Nauka, 429 p. (in Russian)

Информация об авторах

Сафина Наталья Павловна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; natali.safina2015@yandex.ru

Коровко Анатолий Васильевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; korovko@igg.uran.ru

Блинов Иван Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; ivan_a_blinov@ mail.ru

Анкушева Наталья Николаевна – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; ankusheva@mail.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

Филиппова Ксения Александровна – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; kseniyafil@yandex.ru

Information about the authors

Natalia P. Safina – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia; natali.safina2015@yandex.ru

Anatoly V. Korovko – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia; korovko@igg.uran.ru

Ivan A. Blinov – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia; ivan_a_blinov@mail.ru

Natalia N. Ankusheva – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia; ankusheva@mail.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

Kseniya A. Filippova – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia; kseniyafil@yandex.ru