



УДК 553.411.071

<https://doi.org/10.35597/2313-545X-2025-11-2-4>

ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ В ГРАНИТАХ ЮЖНО-СУХТЕЛИНСКОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ЗОЛОТА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

С.И. Брюхов, Д.А. Артемьев,
И.А. Блинов, Н.Р. Аюпова, А.С. Целуйко

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

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

Аннотация. В работе рассмотрены минералого-геохимические особенности золото-сульфидной минерализации кварцевых жил в гранитах Кацбахского комплекса на Южно-Сухтелинском проявлении золота (Южный Урал). Концентрация сульфидов в жилах варьирует от 1 до 3 об. %, редко до 10 об. %, содержание Au составляет 5–10 г/т. Выделены три разновидности самородного золота: 1) в ассоциации с оксигидроксидами железа по сульфидным минералам и в кварце (пробность 649–830 ‰), 2) в ассоциации с турмалином (пробность 870–888 ‰) и оксигидроксидами железа и 3) высокопробное золото в оксигидроксидах железа в ассоциации с фишессеритом и во вторичных минералах меди. Сульфиды представлены пиритом, халькопиритом, сфалеритом и галенитом. Установлено, что пирит обогащен Ni, халькопирит – Ag, Sn и Sb, галенит – Se, Ag, Te, Bi и Sb и сфалерит – Cd, In и Hg. Содержание Au в пирите, халькопирите и сфалерите составляет менее 0.1 г/т, во вторичных сульфидах меди возрастает до 5 г/т и резко увеличивается в оксигидроксидах железа (до 168 г/т). Рудообразование предположительно происходило при постепенном понижении температуры в интервале от 400 до 200 °С, что соответствует последовательности минералообразования пирит → халькопирит → сфалерит → галенит. Окисление сульфидов в зоне гипергенеза привело к выделению высокопробного самородного золота и формированию фишессерита.

Ключевые слова: самородное золото, сульфиды, ЛА-ИСП-МС, Арамильско-Сухтелинская зона, Южный Урал.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госбюджетной темы ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН № 122031600292-6.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность В.В. Масленникову за руководство исследованиями, а также Е.В. Белогуб и И.Ю. Мелекесцевой за редактирование статьи.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

Вклад авторов. С.И. Брюхов – разработка концепции, исследование, визуализация, написание рукописи; Д.А. Артемьев, И.А. Блинов – аналитические работы; Н.Р. Аюпова – разработка концепции, редактирование рукописи; А.С. Целуйко – помощь в обработке фактического материала.

Для цитирования: Брюхов С.И., Артемьев Д.А., Блинов И.А., Аюпова Н.Р., Целуйко А.С. Золото-сульфидная минерализация кварцевых жил в гранитах Южно-Сухтелинского проявления золота (Южный Урал). Минералогия, 2025, 11(2), 70–87. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-2-4.

GOLD-SULFIDE MINERALIZATION OF QUARTZ VEINS IN GRANITES OF THE SOUTH SUKHTELYA GOLD OCCURRENCE (SOUTH URALS)

S.I. Bryukhov, D.A. Artem'yev, I.A. Blinov, N.R. Ayupova, A.S. Tseluyko

South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS,

Miass, Chelyabinsk district, 456317 Russia; simeon.bryukhov@mineralogy.ru

Received 00.00.2025, revised 00.00.2025, accepted 00.00.2025

Abstract. The paper considers mineralogical and geochemical features of gold-sulfide mineralization of quartz veins in granites of the Katsbakh complex in the South Sukhtelya gold occurrence (South Urals). The sulfide content of quartz veins varies from 1 to 3 vol. %, rarely reaching 10 vol. %, and the average Au content is 5–10 g/t. Three types of native gold are identified: 1) in assemblage with Fe oxyhydroxides and in quartz (the fineness of 649–830 ‰), 2) in assemblage with tourmaline (the fineness of 870–888 ‰) and 3) in Fe oxyhydroxides in assemblage with fischerite and in secondary Cu minerals. The sulfides include pyrite, chalcopyrite, sphalerite and galena. Pyrite is enriched in Ni, chalcopyrite contains Ag, Sn, and Sb, galena is rich in Se, Ag, Te, Bi, and Sb, and sphalerite has a higher amount of Cd, In, and Hg. The Au content of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite is less than 0.1 ppm increasing up to 5 ppm in chalcocite and Fe hydroxides (up to 168 ppm). Ores probably formed during a gradual temperature decrease in a range from 400 to 200 °C, which corresponds to the sequence of mineral formation: pyrite → chalcopyrite → sphalerite → galena. The oxidation of sulfides resulted in formation of high-fineness native gold in assemblage with fischerite.

Keywords: native gold, sulfides, LA-ICP-MS, Aramil-Sukhtelya zone, South Urals.

Funding. This work was supported by state contract of the South Ural Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS no. 122031600292-6.

Acknowledgements. The authors are sincerely grateful to V.V. Maslennikov for supervision of studies and E.V. Belogub and I.Yu. Melekestseva for editing the manuscript.

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

Authors contribution. S.I. Bryukhov – conceptualization, research, visualization, writing the manuscript; D.A. Artem'yev and I.A. Blinov – analytical works; N.R. Ayupova – conceptualization, editing the manuscript; A.S. Tseluyko – processing of factual material.

For citation: Bryukhov S.I., Artem'yev D.A., Blinov I.A., Ayupova N.R., Tseluyko A.S. Gold-sulfide mineralization of quartz veins in granites of the South Sukhtelya gold occurrence (South Urals). *Mineralogy*, 2025, **11**(2), 70–87. DOI: 10.35597/2313-545X-2025-11-2-4.

ВВЕДЕНИЕ

Южно-Сухтелинское проявление золота находится в Арамилско-Сухтелинской тектонической мегазоне Урала (рис. 1а). Как и близлежащие участки (Эльдорадо, Змеиное, Астафьевское), оно относится к золото-сульфидно-кварцевой формации. Самородное золото связано с кварцевыми жилами, локализованными в пермских гранитоидах. Вмещающими породами для гранитной интрузии служат каменноугольные тефрогенно-кремнистые углеродистые отложения (Сазонов и др., 2001; Тевелев и др., 2018). Данные о присутствии золотого оруденения в коренном залегании описаны в работах (Бабкин и др., 1971; Тевелев и др., 1998; Сначев и др., 2006), однако состав самородного золота и минералого-геохимические особенности сульфидной минерализации кварцевых жил в гранитоидах Южно-Сухтелинского участка до сих пор не освещены

в литературе. С целью выяснения условий образования золото-сульфидной минерализации в кварцевых жилах проведены минералого-геохимические исследования, результат которых важен для развития существующих представлений о рудообразовании, связанном с внедрением гранитов.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ

Южно-Сухтелинское проявление золота входит в состав Арамилско-Сухтелинской зоны, представляющей собой узкую, вытянутую в северо-восточном направлении полосу шириной около 20–30 км, расположенную между Магнитогорским мега-синклином и Восточно-Уральским поднятием (рис. 1б). Считается, что Арамилско-Сухтелинская зона в раннепалеозойское время являлась восточным флангом Магнитогорской островной дуги и характеризовалась накоплением пород вулка-

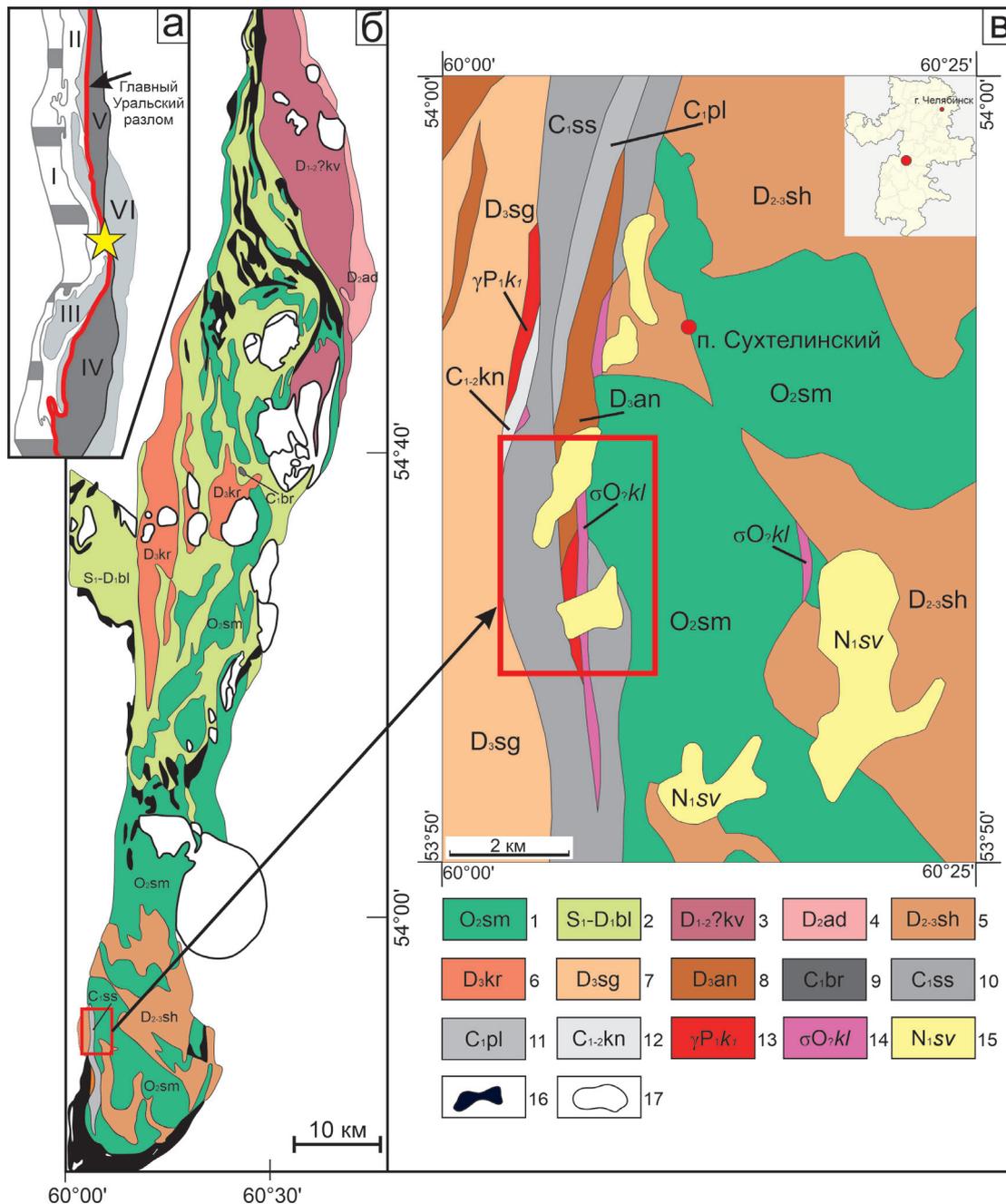


Рис. 1. Позиция Арамилско-Сухтелинской зоны на тектонической карте Урала (Пучков, 2010, а), схематическая геологическая карта Арамилско-Сухтелинской зоны (Сначев и др., 2006; Петров и др., 2003; Пужаков и др., 2018, б) и Южно-Сухтелинского участка (Тевелев и др., 2018, в).

Металлогенические зоны: I – Предуральский прогиб; II – Западно-Уральская; III – Центрально-Уральская; IV – Магнитогорская; V – Тагильская; VI – Восточно-Уральская.

1–11 – Толщи: 1 – шеметовская: базальты, гиалокластитовые брекчии, алевролиты, прослои кремнистых алевролитов; 2 – булатовская; 3 – кулеувская; 4 – аджгаровская; 5 – сухтелинская: алевропесчаники с прослоями углеродистых сланцев, конгломераты, туфы андезитов, базальтов; 6 – краснокаменная; 7 – шелудивогорская: базальты, туфы, алевролиты; 8 – арсинская; 9 – биргильдинская; 10 – сосновская: глинистые, кремнистые, углистые сланцы, конгломераты, алевролиты; 11 – полоцкая; 12 – каморзинская; 13 – кацбахский комплекс граносиенит-умеренно-щелочных гранитов ($\gamma P_1 k_1$); 14 – куликовский комплекс: серпентиниты ($\sigma O_7 kl$); 15 – светлинская свита: глины зеленовато-серые с железомарганцевыми бобовинами, включениями гипса, карбонатными стяжениями, бокситы; 16 – гипербазитовые массивы; 17 – контуры интрузивных массивов.

Fig. 1. Position of the Aramil-Sukhtelya Zone on tectonic map of the Urals (Puchkov, 2010, a), schematic geological map of the Aramil-Sukhtelya Zone (Snachev et al., 2006; Petrov et al., 2013; Puzhakov et al., 2018, б), and South Sukhtelya area (Tevelev et al., 2018, в).

Metallogenic zones: I – Preuralian foredeep; II – West Uralian; III – Central Uralian; IV – Magnitogorsk; V – Tagil; VI – East Uralian.

1–11 – Sequences: 1 – Shemetovskaya: basalt, hyaloclastite breccia, siltstone, interlayers of siliceous siltstone; 2 – Bulatovo; 3 – Kuluevo; 4 – Adzhitar; 5 – Sukhtelya: siltstone with interlayers of carbonaceous shale, conglomerate, andesite tuff, basalt; 6 – Krasnokamenskaya; 7 – Sheludivogorskaya: basalt, tuff, siltstone; 8 – Arsinskaya; 9 – Birgilda; 10 – Sosnovka: clay, siliceous, coaliferous shale, conglomerate, siltstone; 11 – Polotskaya; 12 – Kamorza; 13 – Katsbakh complex of granosyenite-moderately alkaline granites ($\gamma P1kl$); 14 – Kulikovsky complex: serpentinites ($\sigma O?kl$); 15 – Svetlinskaya Formation: greenish gray clays with Fe-Mn nodules, gypsum inclusions, carbonate concretions, bauxites; 16 – ultramafic rocks; 17 – contours of intrusives.

ногенных и вулканогенно-осадочных формаций, а на коллизионном этапе она была шарьирована в восточном направлении на западный край Восточно-Уральского микроконтинента (Пучков, 2000).

В пределах Южно-Сухтелинского участка распространены 1) субщелочные базальтоиды и их вулканокластиты с прослоями кремнистых туффигов, алевролитов и яшмоидов шеметовской толщи (O_2sm), 2) алевролиты и песчаники арсинской толщи (D_3an), 3) базальты, туфы и алевролиты шелудивогорской толщи (D_3sg), 4) алевропесчаники с прослоями углеродистых сланцев, конгломераты, туфы андезитов и базальтов сухтелинской толщи (D_{2-3sh}), 4) глинистые, кремнистые и углистые сланцы, конгломераты и алевролиты сосновской толщи (C_{1ss}) и 5) неогеновые озерно-аллювиальные, делювиальные и пролювиальные отложения светлинской толщи, N_{1sv}) (Тевелев и др., 1998, рис. 1в).

Через Южно-Сухтелинский участок в субмеридиональном направлении простирается мало-мощное субвертикальное плитообразное тело серпентинитов куликовского комплекса ($\sigma O?kl$), располагающееся вдоль контакта углеродисто-кремнистой сосновской толщи и гранитов кацбахского комплекса ($\gamma P1kl$). Граниты внедрены в карбоновые тейфрогенно-кремнистые углеродистые отложения (Мосейчук и др., 2017). На контакте с углеродистыми сланцами граниты гидротермально изменены и пронизаны разноориентированными кварцевыми жилами, в которых отмечаются сульфидная минерализация и видимое золото. Рудная зона охватывает как экзо- так и эндоконтакт гранитов и сланцевой толщи, имеет длину ~50 м и мощность ~7 м, вскрыта канавами. Кроме того, кварцевые жилы обнаружены в контурах отработанной золотоносной россыпи.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Штупные образцы кварцевых жил размером, в среднем, 15×15×15 см с сульфидной минерализацией и видимым золотом отобраны во время картирования участка 3×6 км для выявления коренных источников золоторудной минерализации. Для изучения минерального состава изготовлено 27 аншлифов. Все исследования выполнены в Южно-Уральском федеральном научном центре минералогии и геоэкологии УрО РАН (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН), г. Миасс.

Оптико-микроскопическое изучение аншлифов проводилось в отраженном свете на микроскопе Olympus BX51 с цифровой приставкой и камерой DP12. Химический состав самородного золота и ассоциирующих с ними сульфидных минералов проанализирован на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan Vega 3 sbu с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments X-act (ускоряющее напряжение 20 кВ, время набора спектра 120 с) (аналитик И.А. Блинов). Пределы обнаружения содержаний химических элементов не превышают 0.2 мас. %.

Метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА-ИСП-МС) применялся для изучения микроэлементного состава сульфидных минералов и оксигидроксидов железа. Анализы выполнялись на приборе New Wave Research UP213 YAG Laser Ablation System (аналитик Д.А. Артемьев). Обработка полученных результатов проводилась в программе Iolite. Были проанализированы: кристаллически-зернистый пирит (15 ан.), халькопирит (15 ан.), сфалерит (15 ан.), галенит (12 ан.) и тонкозернистая смесь халькозина, гидроксидов железа, халькопирита, сфалерита и галенита (15 ан.), а также гетит (12 ан.) и кварц (12 ан.). Статистическая обработка результатов проводилась с построением матрицы коэффициентов парной корреляции и иерархическим кластерным анализом в программе «Statistica».

Для расчета температуры минералообразования по данным анализов ЛА-ИСП-МС, использованы Fe-Ga-Ge-Mn-In геотермометр для сфалерита: $T(^{\circ}\text{C}) = (54.4 \pm 7.3) \text{ PC1} + (208 \pm 10)$, где $\text{PC1} = \ln\left(\frac{C_{\text{Ga}}^{0.22} \cdot C_{\text{Ge}}^{0.22}}{C_{\text{Fe}}^{0.37} \cdot C_{\text{Mn}}^{0.20} \cdot C_{\text{In}}^{0.11}}\right)$ (Frenzel et al., 2016) и пирита: $\text{Se(pyrite)} = 5 \cdot 10^{13} \cdot T^{-4/82}$ (Keith et al., 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Кварцевые жилы

Граниты вдоль контакта с углеродистыми сланцами осветлены, серицитизированы и аргиллизированы. В зоне контакта с углеродистыми сланцами присутствуют многочисленные разноориентированные кварцевые жилы с золото-сульфидной и золото-сульфидно-турмалиновой минерализацией. Жилы длиной до 10 м имеют линзовидную форму, резкие контакты, мощность их колеблется от нескольких сантиметров до 1 м. Содержание Au в участках развития кварцевых жил составляет 5–10 г/т. Распределение самородного золота крайне неравномерное.

Жильный кварц средне- и крупнозернистый, молочно-белый, местами с прозрачными участками. Золото-сульфидная минерализация распространена неравномерно, преимущественно, в крупных жилах в виде скоплений размером 0.5–1.5 см, выполняя интерстиции между зернами кварца. Содержание сульфидов в жилах варьирует от 1 до 3 об. %, реже до 10 об. % (рис. 2а, б). Преобладающим сульфидным минералом является пирит, в подчиненном количестве присутствуют халькопирит, сфалерит, галенит, пирротин и вторичные сульфиды меди. В турмалин-кварцевых жилах агрегаты самородного золота размером до 2 см заполняют полости в кварце и цементируют кристаллы турмалина. Процессы окисления проявлены в широком развитии бурых, красновато-бурых и охристых пленок и агрегатов оксигидроксидов железа.

Сульфидная минерализация

Для пирита характерны агрегаты эвгедральных и субгедральных, нередко трещиноватых кристаллов, размер которых варьирует от 0.1 до 0.5 мм. В пирите присутствуют редкие включения галенита, сфалерита и халькопирита. Трещиноватые агрегаты пирита цементируются халькопиритом, сфалеритом и галенитом (рис. 2в, г). Границы между

сульфидами ровные, редко корродированы. Пирит в значительной степени замещен оксигидроксидами железа, на отдельных участках – практически полностью (рис. 2д).

Халькопирит образует прожилковые и гнездовидные агрегаты размером 0.03–0.60 мм (рис. 2е–з). Границы халькопирита с кварцем и пиритом ровные, со сфалеритом и галенитом – сложные, извилистые. Халькопирит часто наблюдается в виде сростков с галенитом и сфалеритом, а также присутствует в виде эмульсиевидной вкрапленности размером 0.001–0.100 мм и включений размером до 0.03 мм в сфалерите, залечивает трещины в кристаллах пирита. В халькопирите присутствуют редкие тонкие пластинки пирротина размером до 0.3 мм. Значительная часть зерен халькопирита замещается по границам вторичными сульфидами меди.

Сфалерит в большинстве случаев представлен ангедральными, реже субгедральными гнездовидными агрегатами размером 0.05–0.50 мм (рис. 2з–к). Для сфалерита характерны светлые внутренние рефлексы. Чаще всего он встречается совместно с халькопиритом и галенитом, редко – с пиритом. С галенитом сфалерит имеет четкие границы.

Галенит чаще всего ассоциирует с халькопиритом и сфалеритом и реже встречается в виде обособленных мономинеральных агрегатов (рис. 2к–м). Образует субгедральные и ангедральные агрегаты размером 0.01–0.30 мм, встречается в виде прожилков в агрегатах халькопирита, сфалерита и пирита, реже образует тесные сростания с вторичными минералами меди. Границы с халькопиритом сложные и извилистые, а со сфалеритом и пиритом – ровные, иногда галенит корродирует кристаллы пирита. На отдельных участках, часто в ассоциации с оксигидроксидами железа, галенит почти полностью замещается вторичными минералами меди.

Вторичные сульфиды меди образуют каемки замещения и сеть прожилков по трещинам в халькопирите и галените (рис. 2м–о). Совместно с оксигидроксидами железа часто полностью замещают агрегаты халькопирита и галенита. Вторичные сульфиды меди имеют неоднородную, пятнистую структуру, окрашены в серовато-синеватые, светло-голубоватые и ярко-синие цвета. Агрегаты галенита, замещенные вторичными медными минералами, характеризуются реликтовыми включениями, каймами и прожилками первичного сульфида.

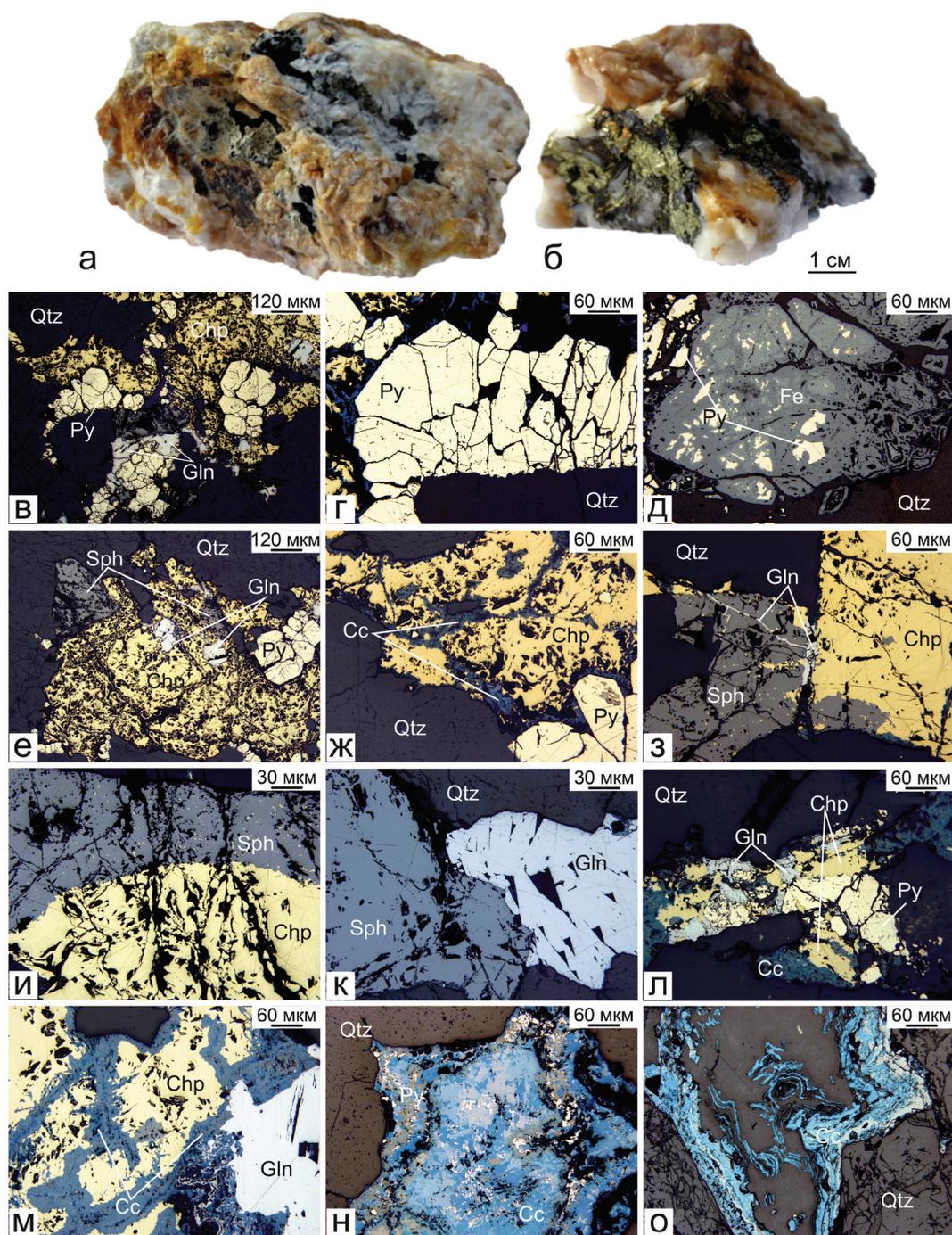


Рис. 2. Сульфидная минерализация в кварцевых жилах: а, б – прожилковые и гнездовидные скопления сульфидов в крупнозернистом кварце; в – пиритовые агрегаты в ассоциации с халькопиритом и галенитом; г – трещиноватые эв- и субгедральные кристаллы пирита; д – реликты пирита в оксигидроксидах железа; е – обособленные агрегаты эвгедральных кристаллов пирита в халькопирите; ж – развитие вторичных сульфидов меди по краям халькопирита; з – халькопирит с включениями сфалерита в тесном срастании со сфалеритом с халькопиритовой вкрапленностью и прожилками галенита; и – срастание халькопирита со сфалеритом с эмульсиевидными включениями халькопирита; к – сфалерит-галенитовая ассоциация; л – пирит с халькопиритом и галенитом, развитие вторичной медной минерализации по халькопириту; м – замещение халькопирита и галенита вторичными сульфидами меди; н – реликты пирита и галенита во вторичной медной минерализации; о – реликтовые включения, каймы и прожилки вторичной медной минерализации по галениту.

а, б – фото образцов; в-о – отраженный свет. Qtz – кварц, Py – пирит, Chp – халькопирит, Sph – сфалерит, Gln – галенит, Fe – оксигидроксида железа, Сс – вторичные сульфиды меди.

Fig. 2. Sulfide mineralization in quartz veins: а, б – veins and pockets of sulfides in coarse-grained quartz; в – pyrite aggregates in assemblage with chalcopyrite and galena; г – fractured euhedral and subhedral pyrite; д – pyrite relics in Fe oxyhydroxides, е – euhedral pyrite crystals in chalcopyrite; ж – replacement of chalcopyrite by second copper sulfides along the edges; з – chalcopyrite with sphalerite inclusions closely intergrown with sphalerite with chalcopyrite dissemination; и – intergrowth of chalcopyrite and sphalerite; к – sphalerite-galena assemblage; л – pyrite with chalcopyrite and galena; м – replacement of chalcopyrite and galena by secondary copper minerals; н – relics of pyrite and galena in second copper sulfides; о – relict inclusions, rims, and veinlets of secondary copper mineralization replacing galena.

а, б – sample photos; в-о – reflected light. Qtz – quartz, Py – pyrite, Chp – chalcopyrite, Sph – sphalerite, Gln – galena, Fe – iron oxyhydroxide, Cc – secondary copper sulphides.

Температуры образования пирита и сфалерита из кварцевых жил, рассчитанные с использованием Se и Fe-Ga-Ge-Mn-In геотермометров, составляют 357–420 °С (среднее 401 °С) и 226–263 °С (среднее 247 °С) соответственно (табл. 1).

Самородное золото

По химическому составу, морфологии и минеральной ассоциации выделены три разновидности самородного золота. Первая разновидность встречается в сульфидно-кварцевых жилах, где самородное золото ассоциирует с оксигидроксидами железа, развивающимися по пириту, и в кварцевой массе (рис. 3а–г). Самородное золото образует мелкие, прожилковидные выделения размером от 0.01 до 0.05 мм. Пробность золота варьирует от 649 до 830 ‰ при среднем значении 738 ‰ (мас. %: Au 64.89–83.02, Ag 16.95–35.11, табл. 2).

Вторая разновидность установлена в кварц-сульфидно-турмалиновых жилах, где самородное золото образует более крупные (до 0.9 мм) агрегаты (рис. 3д, е). Пробность золота в жилах с турмалином колеблется от 870 до 888 ‰ (мас. %: Au 87.06–88.77, Ag 11.44–12.38, табл. 2).

Третья разновидность присутствует в оксигидроксидах железа и во вторичной медной минерализации и образует тонкие, губчатые агрегаты (размер 0.001–0.005 мм, рис. 3ж, з). Золото характеризуется высокой пробностью 999 ‰ (Au 99.3–100 мас. %, табл. 2). Редко в оксигидроксидах железа наблюдаются тонкие прожилки (размер менее 0.01 мм) самородного золота в сростании с фишессеритом (мас. %): Se 22.42, Ag 51.84, Au 26.75 (рис. 3и, к).

Элементы-примеси в сульфидных минералах

Содержание элементов-примесей в сульфидах по результатам ЛА-ИСП-МС анализов приведено в табл. 3 и на рис. 4. Пирит обогащен Ni (684–7950 г/т), а также характеризуется варьирующими содержаниями (г/т) Se (11.3–24.7), Co (0.53–9.82),

Таблица 1

Расчетные температуры образования минералов (Т °С) на Южно-Сухтелинском рудопроявлении

Table 1

Calculated temperatures of mineral formation (Т °С) for the South Sukhtelya occurrence

№	Пирит	Сфалерит
1	412	263
2	415	248
3	408	226
4	378	229
5	406	230
6	389	237
7	406	259
8	393	251
9	415	256
10	357	239
11	408	260
12	420	262
13	412	256
Минимум	357	226
Максимум	420	263
Среднее	401	247
Медиана	408	251

Sb (0.04–7.20), Bi (0.01–60.50) и крайне низкими (<0.1 г/т) содержаниями других элементов. В халькопирите установлены повышенные (здесь и далее: по отношению к другим изученным сульфидам) содержания (г/т) Ag (7.44–92.30), Sn (42.6–64.7) и Hg (12.2–22.8), также по сравнению с пиритом отмечается незначительное возрастание содержаниями Cd, In, Sb и Pb. Высокие содержания (г/т) Se (1300–1546), Ag (1905–2377), Te (376–443), Bi (5207–5752) и Sb (132–187) – характерная черта галенита. Сфалерит отличается высокими содержаниями (г/т): Cd (1218–1682), повышенными In (14.4–30.9), Hg (99.3–141), иногда аномальными (до

Таблица 2

Химический состав (мас. %) самородного золота Южно-Сухтелинского участка

Table 2

Chemical composition (wt. %) of native gold from the South Sukhtelya area

№ п/п	Ag	Au	Сумма	Формула
Золото в ассоциация с сульфидными минералами и оксигидроксидами железа				
1	19.44	80.56	100.00	Au _{0.69} Ag _{0.31}
2	29.42	70.16	99.58	Au _{0.57} Ag _{0.43}
3	30.41	69.59	100.00	Au _{0.56} Ag _{0.44}
4	29.97	69.29	99.26	Au _{0.56} Ag _{0.44}
5	32.71	67.79	100.50	Au _{0.53} Ag _{0.47}
6	35.11	64.89	100.00	Au _{0.50} Ag _{0.50}
7	20.84	79.37	100.22	Au _{0.68} Ag _{0.32}
8	16.95	83.02	99.98	Au _{0.73} Ag _{0.27}
9	27.73	72.27	100.00	Au _{0.59} Ag _{0.41}
10	25.22	74.88	99.55	Au _{0.62} Ag _{0.38}
11	24.05	75.50	100.10	Au _{0.63} Ag _{0.37}
12	24.23	75.55	99.78	Au _{0.63} Ag _{0.37}
13	24.27	76.60	100.87	Au _{0.63} Ag _{0.37}
Среднее:	26.18	73.81		
Медиана:	25.22	74.88		
Золото в ассоциация с турмалином				
14	11.98	87.26	99.24	Au _{0.80} Ag _{0.20}
15	11.68	88.17	99.84	Au _{0.81} Ag _{0.19}
16	11.64	88.31	99.95	Au _{0.81} Ag _{0.19}
17	11.90	88.77	100.67	Au _{0.80} Ag _{0.20}
18	12.21	87.06	99.27	Au _{0.82} Ag _{0.18}
19	12.27	88.21	100.48	Au _{0.80} Ag _{0.20}
20	11.44	87.90	99.34	Au _{0.81} Ag _{0.19}
21	12.38	87.92	100.29	Au _{0.80} Ag _{0.20}
22	11.45	88.73	100.18	Au _{0.81} Ag _{0.19}
Среднее:	11.88	88.04		
Медиана:	11.90	88.17		
Тонкодисперсное золото в оксигидроксидах железа и во вторичной медной минерализации				
23	–	100	100	Au _{1.00}
24	–	100	100	Au _{1.00}
25	–	100	100	Au _{1.00}

4340) содержаниями Pb. В нем также зафиксированы (г/т): Co (1.7–11.2), Se (5.3–11.3), Ag (2.2–29.2), Mn (2.5–12.2) и Ga (2.3–27.6). Содержание Au в пирите, халькопирите и сфалерите составляет менее 0.1 г/т, во вторичных сульфидах меди возрастает до 5 г/т (среднее 0.58 г/т) и резко увеличивается в оксигидроксидах железа (2.3–168.0 г/т) (табл. 2). Содержания Ag возрастает в ряду (среднее, г/т): пирит (0.1) – сфалерит (4.9) – халькопирит (48.8) – вторичные сульфиды меди (80.7) – галенит (2248). В оксигидроксидах железа его содержание уменьшается до 11.4 г/т.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Формирование золоторудной минерализации

В результате проведенного исследования можно выделить две генерации самородного золота. Первая генерация умеренно высокопробного самородного золота связана с сульфидно-кварцевыми и сульфидно-кварц-турмалиновыми жилами (1 и 2 ассоциация). Вторая генерация весьма высокопробного самородного золота формирует тончайшие включения и прожилки в оксигидроксидах Fe,

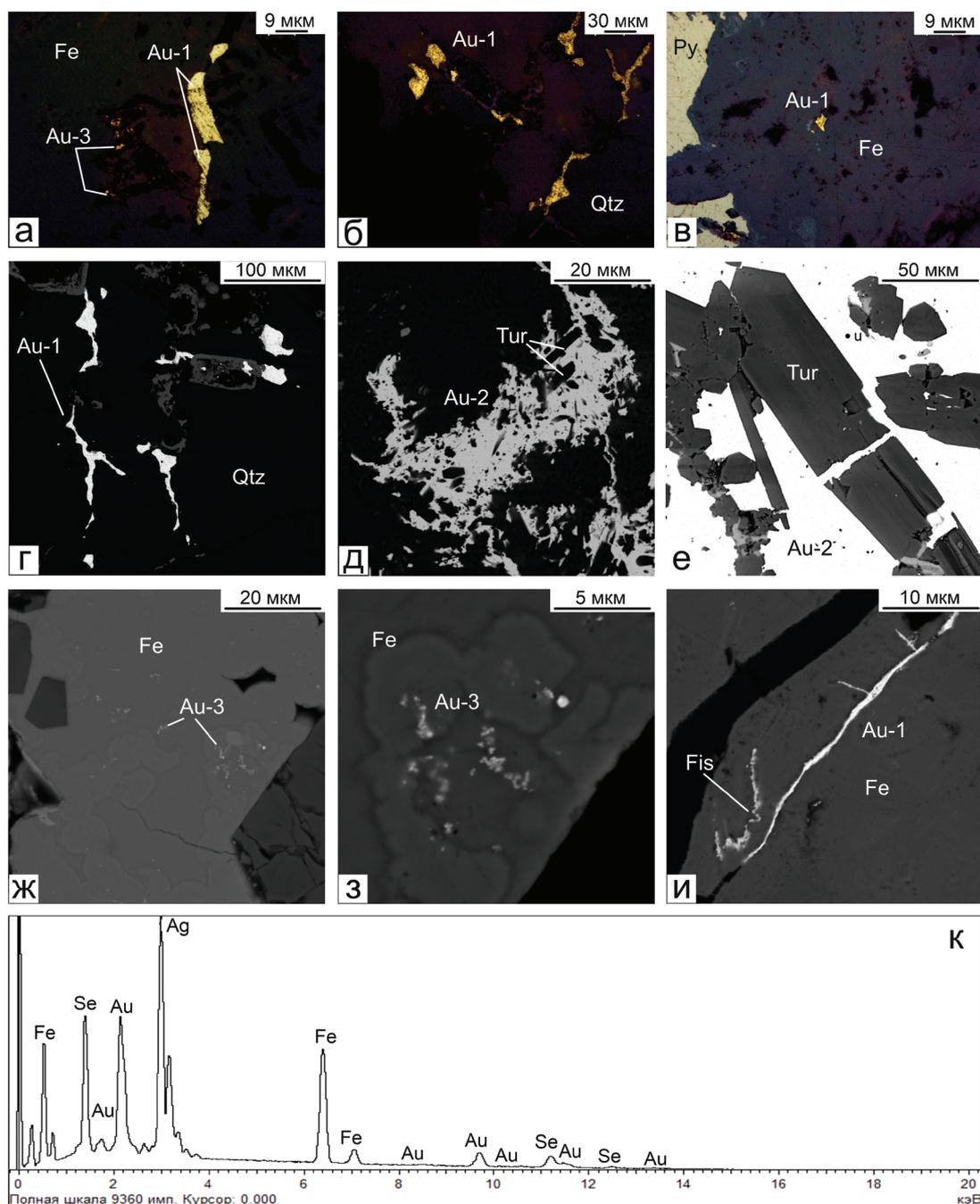


Рис. 3. Самородное золото в кварцевых жилах: а, б – прожилки золота в оксигидроксидах железа (а) и кварце (б); в – включение золота в оксигидроксидах железа, замещающих пирит; г – прожилки золота в кварце, деталь рис. б; д, е – золото в турмалин-кварцевой ассоциации; ж, з – тонкие включения новообразованного золота в оксигидроксидах железа; и – тонкие прожилки золота и фишессерита в оксигидроксидах железа; к – спектр фишессерита.

а–в – отраженный свет; г–и – СЭМ фото. Самородное золото в кварцевых жилах и в оксигидроксидах железа (Au-1), в ассоциации с турмалином (Au-2), в оксигидроксидах железа (Au-3); Fe – оксигидроксида железа, Fis – фишессерит.

Fig. 3. Native gold in quartz veins: а, б – gold veinlets in Fe oxyhydroxides (а) and quartz (б); в – inclusion of gold in Fe oxyhydroxides after pyrite; г – veinlets of gold in quartz, detail of fig. б; д, е – gold in tourmaline-quartz assemblage; ж, з – inclusions of newly formed gold in Fe oxyhydroxides; и – veinlets of gold and fischesserite in Fe oxyhydroxides к – spectrum of fischesserite.

а–в – reflected light; г–и – SEM photos. Native gold in quartz veins and Fe oxyhydroxides (Au-1), in assemblage with tourmaline (Au-2), and newly formed high-fineness gold in Fe oxyhydroxides (Au-3); Fe – iron oxyhydroxides, Fis – fischesserite.

Таблица 3

Элементы-примеси (г/т) в сульфидных минералах кварцевых жил Южно-Сухтелинского участка (данные LA-ICP-MS анализов)

Table 3

Trace elements (ppm) in sulfide minerals from quartz veins of the South Sukhtelya occurrence (LA-ICP-MS data)

Минерал	Mn	Co	Ni	Se	Au	Ag	Cd	In	Sn	Sb
Пирит	0.15 0.02–2.33	3.25 0.53–9.82	2300 684–7950	13.40 11.30–24.70	0.010 0.001–0.100	0.100 0.001–23.100	0.22 0.001–7.900	0.010 0.001–0.230	0.08 0.01–4.40	1.68 0.04–7.23
Халькопирит	0.68 0.05–0.93	0.04 0.001–0.100	0.96 0.26–69.10	5.60 2.50–9.20	0.03 0.01–0.09	48.80 7.44–92.30	3.70 1.89–5.80	4.70 4.04–7.03	58.20 42.60–64.70	4.41 2.00–16.61
Галенит	0.25 0.001–0.580	0.03 0.01–0.05	0.08 0.01–0.22	1423 1300–1546	0.01 0.001–0.040	2248 1905–2377	15.80 7.70–39.90	0.020 0.001–0.030	5.12 1.42–6.73	166.85 132.10–186.90
Сфалерит	9.93 2.55–12.16	10.26 1.69–11.24	0.36 0.04–0.76	8.00 5.30–11.30	0.05 0.02–0.12	4.93 2.16–29.20	1299 1218–1682	17.02 14.43–30.99	0.54 0.31–2.65	2.85 0.44–22.64
Вторичные сульфиды меди	1.04 0.30–3.70	3.25 1.58–39.40	17.00 11.90–144.50	29.5 18.20–51.00	0.58 0.18–5.00	80.7 43.00–507.00	230 80–5190	9.90 5.40–23.70	48.70 23.50–102.00	15.50 8.80–54.70
Оксигидроксиды железа	0.32 0.27–1.40	0.05 0.02–0.18	225.90 59.60–1597.00	5.70 2.89–20.90	7.59 2.25–168.00	11.41 1.24–213.00	9.71 1.77–36.10	1.38 0.01–6.38	0.46 0.27–14.62	22.70 0.54–349.20
	Te	Hg	Pb	Bi	Ga	Ge	Zn	Cr	As	Mo
Пирит	0.49 0.08–13.20	0.62 0.39–2.76	9.80 0.08–11940.00	0.21 0.01–60.50	0.07 0.01–1.52	–	6.60 3.25–2700.00	0.22 0.05–0.35	0.48 0.18–4.81	0.010 0.001–0.110
Халькопирит	0.001 0.001–0.740	16.90 12.20–22.80	6.06 3.00–780.00	0.72 0.46–2.62	2.20 1.16–2.61	–	487 398–901	0.38 0.02–0.84	1.28 0.54–2.50	0.001 0.001–0.03
Галенит	413.50 376.00–443.00	0.85 0.16–2.30	85.9–86.1*	5541 5207–5752	0.020 0.001–0.030	0.100 0.001–0.220	1.41 0.04–40.10	0.22 0.16–0.56	4.35 3.79–4.88	0.01 0.001–0.07
Сфалерит	0.42 0.001–3.200	122.70 99.30–141.40	13.10 5.87–4340	0.69 0.14–24.80	4.49 2.26–27.60	0.86 0.51–1.09	67.5* 66.7–68.5	0.37 0.04–0.98	3.59 2.74–4.21	0.02 0.001–0.05
Вторичные сульфиды меди	0.001 0.001–0.200	12.3 1.80–127.00	7460.0 3608.0–2.5**	0.55 0.14–7.60	3.00 1.00–7.50	–	14190 2660–2.2**	0.37 0.04–0.98	36.00 0.30–178	1.40 0.21–7.10
Оксигидроксиды железа	–	–	1764.50 83.20–1.50**	77.55 0.19–1857.00	0.27 0.02–1.45	–	3715.00 24.70–4920.00	5.34 0.07–113.00	8745 480–15070	24.25 0.72–70.40

Примечание. Числитель – медиана, знаменатель – минимальные и максимальные содержания; * – мас. %; ** – г/т – мас. %.
Note. Nominator – median, denominator – minimum and maximum contents; * – wt. %; ** – ppm – wt. %.

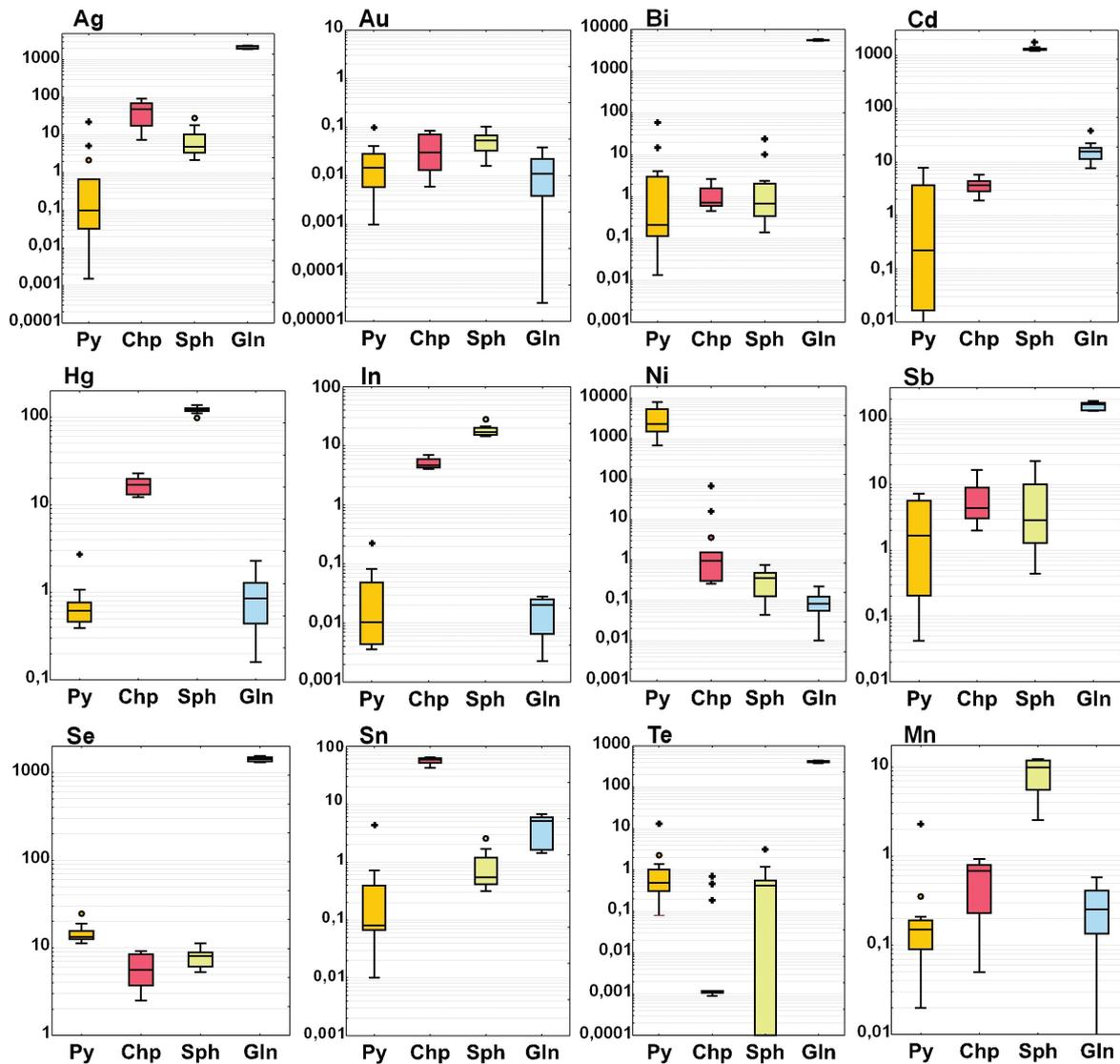


Рис. 4. Распределение элементов-примесей в сульфидах Южно-Сухтелинского участка по результатам ЛА-ИСП-МС анализов.

Окрашенные прямоугольники ограничены по вертикали 25 и 75 % квартилями, горизонтальная линия в прямоугольниках – значения медианы. Вертикальные линии характеризуют минимальные и максимальные значения. Круглые точки за пределами вертикальных линий – аномальные выбросы.

Fig. 4. Distribution of trace elements in sulfides of the South Sukhtelya occurrence according to LA-ICP-MS analyses.

Colored rectangles are vertically limited by 25 and 75 % quartiles, horizontal line in rectangles is median. Vertical lines characterize minimum and maximum values. Round points outside the vertical lines are anomalous values.

псевдоморфно заместивших первичные сульфиды (3 ассоциация). Появление тонких межзерновых прожилков и периферических кайм высокопробного золота на более низкопробном (Петровская, 1973) свидетельствует о его переотложении в результате разложения сульфидов и, возможно, неустойчивых минералов золота. При этом Ag, как более подвижный элемент в зоне гипергенеза, по сравнению с золотом, проявляет тенденцию к расщиванию (Крейтер и др., 1958).

Температуры образования сульфидов

Учитывая наблюдаемые в аншлифах взаимоотношения минералов и расчетные температуры их образования, первым из сульфидов отлагался пирит, затем халькопирит, сфалерит и галенит. Отложение пирита происходило при снижении температуры флюидов от 420 до 357 °С. Вариации содержания Se в пирите объясняются действием различных факторов. Среди них – изменение тем-

пературы флюида (Belousov et al., 2016; Keith et al., 2018), однако мнение различных исследователей по этому вопросу противоречиво. Ряд исследователей считает, что содержание Se в пирите с повышением температуры флюида увеличивается (Auclair et al., 1987; Maslennikov et al., 2009; Revan et al., 2014) или уменьшается (Huston et al., 1995; Keith et al., 2018). Также содержание Se в пирите может изменяться в зависимости от pH и редокс-условий, а также зависеть от соотношения Se к S (Σ Se/S) в рудоформирующем флюиде (Huston et al., 1995). По-видимому, содержания Se в пирите зависят от комбинации нескольких факторов, но полученные нами температуры вполне реалистичны для гидротермальных процессов.

Температуры отложения сфалерита, рассчитанные по Ga–Ge геотермометру (Frenzel et al., 2016), составляют 280–214 °С, что соответствует средне-низкотемпературному диапазону гидротермального рудообразования и наблюдаемой последовательности формирования минералов.

Ассоциация фишессерита (Ag_3AuSe_2) с высокопробным самородным золотом в виде тонких прожилков в оксигидроксидах железа однозначно свидетельствует о ее гипергенном происхождении. Ранее было показано, что образование такой ассоциации возможно при температурах ниже 100 °С, фугитивности Se $lg f_{Se_2}$ от –14 до –24 и низкой фугитивности S (Пальянова и др., 2016).

Геохимические особенности минералов

По результатам статистической обработки результатов ЛА-ИСП-МС анализа можно выделить ассоциации элементов и предположить форму их нахождения в конкретных сульфидных минералах (рис. 5).

В пирите обособляются ассоциации, вероятно связанные с микровключениями галенита или сульфосолей (Pb + Bi + Ag + Te, в меньшей степени, Sb + Se) и сфалерита (Hg + Zn) и (Cd + Co). Золото и Ag характеризуются сильной положительной корреляцией (0.92) (электронное приложение – ЭП), что указывает на присутствие микровключений самородного золота, которые в других первичных сульфидах не наблюдаются (рис. 6). Никель, скорее всего, изоморфно входит в пирит (Мозгова, 1975).

В халькопирите элементы-примеси не образуют значимых корреляционных связей, за исключением Bi + Sb, что, вероятно, указывает на микровключения Bi и Bi–Sb сульфосолей (Cook, 1997). Высокие содержания Zn (398–901 г/т) и Hg (12.2–22.8 г/т) отражают наличие микровключений сфалерита. Повышенные содержания Sn (42.6–64.7 г/т) могут указывать на более высокие температуры образования халькопирита относительно сфалерита и галенита (George et al., 2016).

В сфалерите отчетливо проявлена ассоциация (Bi + Pb) + (Sb + Ag) указывающая на микровключения обогащенного этими элементами гале-

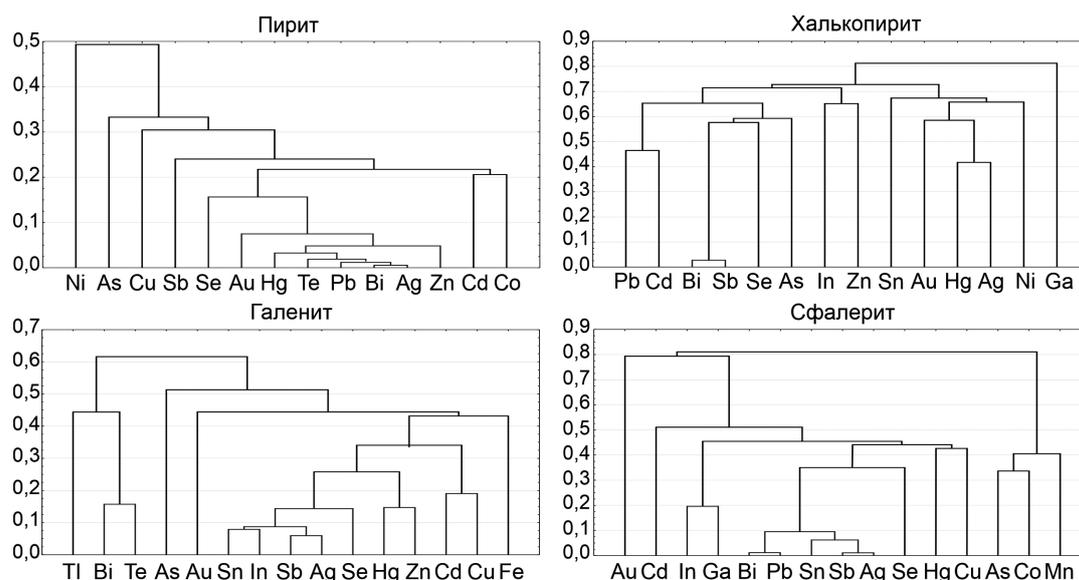


Рис. 5. Иерархическая кластеризация элементов-примесей сульфидов Южно-Сухтелинского участка (объединены методом одиночной связи, расстояние между кластерами 1–r Пирсона).

Fig. 5. Hierarchical clustering of trace elements of sulfides of the South Sukhtelya occurrence (combined by single linkage method, distance between clusters Pearson's 1-r).

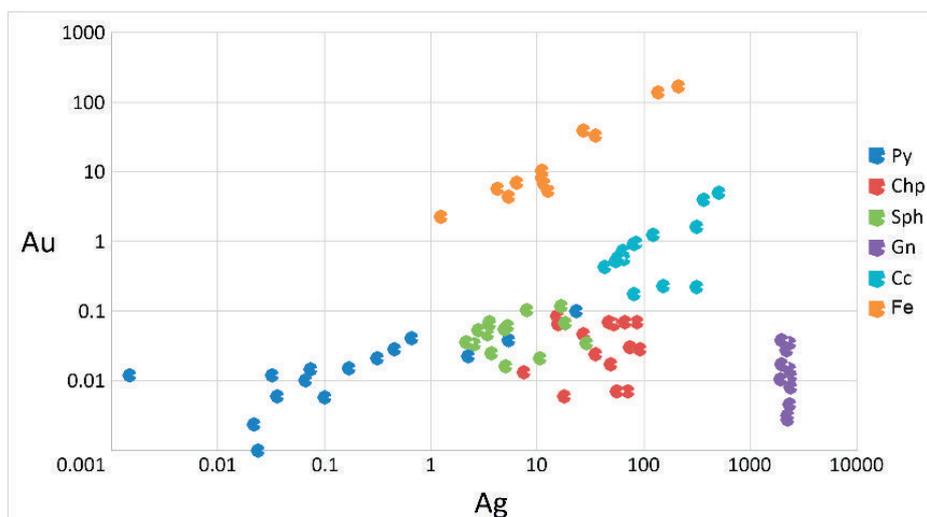


Рис. 6. Зависимость содержаний Au от Ag в сульфидах по данным ЛА-ИСП-МС анализов.
Fig. 6. Correlation between Au and Ag contents in sulfides according to LA-ICP-MS analysis data.

нита либо соответствующих сульфосолей. Повышенные содержания Cd (1218–1682 г/т), Hg (99.3–141.4 г/т), Mn (2.55–12.16 г/т), In (14.43–30.99 г/т) объясняются их изоморфным вхождением в структуру сфалерита (Cook et al., 2009).

Галенит по сравнению с другими сульфидами наиболее обогащен элементами-примесями. Высокие содержания Ag (1905–2377 г/т), Bi (5207–5752 г/т), Sb (132–186 г/т) и сильная корреляция Ag и Sb (0.94, ЭП) могут указывать на их вхождение в структуру галенита по схеме гетеровалентного замещения $Ag^+ + (Bi, Sb)^{3+} \leftrightarrow 2Pb^{2+}$ (Chutas et al., 2008; Renock, Becker 2011; George et al., 2015). Отсутствие корреляции Ag и Sb с Cu, Zn и As косвенно подтверждает изоморфизм, а не присутствие микровключений блеклых руд (Плотинская и др., 2019). Сильная корреляция между Bi и Te (0.84, ЭП) может указывать на микровключения тетрадимита (Плотинская и др., 2019). Высокие содержания Se могут быть обусловлены изоморфным вхождением этого элемента в структуру галенита, что подтверждается существованием непрерывной изоморфной серии галенит-клаусталит (PbSe). Повышенные концентрации Te можно связать с микровключениями алтаита (PbTe) (Liu, Chang, 1994), но нельзя исключить и изоморфного вхождения Te (George et al., 2015). Ассоциация Sn + In вероятно связана с микровключениями халькопирита. Высокие концентрации Cd, и ассоциация Hg и Zn с сильной корреляцией (0.85, ЭП) – сфалерита.

Сильная положительная корреляция между Au и Ag (0.99 для оксигидроксидов железа и 0.82

для вторичных сульфидов меди, ЭП) указывает на то, что самородное золото здесь находится в виде микровключений. Обогащение другими элементами связано с наследованием химического состава первичных сульфидов при окислении. Высокое содержание As (480–15070 г/т) в оксигидроксидах железа, вероятно, вызвано наличием микровключений мышьяковистых минералов либо с сорбционными свойствами оксигидроксидов Fe^{3+} , т. к. в первичных сульфидах концентрации As незначительны. Только вторичные сульфиды меди характеризуются единичными анализами с концентрацией As до 178 г/т.

Источник золота

В качестве источника золота в изученном участке можно рассматривать сами граниты и вмещающие их породы: углеродистые сланцы, вулканогенно-осадочные толщи и ультрамафиты.

Кларк золота в гранитах низкий (2.7 мг/т, Овчинников, 1990), но при отделении флюида при становлении гранитных интрузивов флюид обогащается золотом минимум на два порядка (Коробейников, Черняева, 1987). Вклад магматогенного флюида в формирование золотого оруденения рассматриваемого проявления может косвенно подтверждаться присутствием в жилах турмалина, хотя наличие бора вполне вероятно и в углеродистых осадочных толщах (например, Пантелеева и др., 2023).

При внедрении гранитов прогрев вмещающих пород с мобилизацией поровых растворов и

их смешение с магматогенными флюидами может привести к экстракции золота из вмещающих пород. Обогащение галенита селеном может указывать на вовлечение в гидротермальный процесс селена из углеродистых сланцев, обогащенных этим элементом (Юдович, Кетрис, 1988). При гипергенезе селен из окисленного галенита вошел в состав новообразованного фишессерита. На вклад серпентинитов в гидротермальные флюиды косвенно указывают повышенные концентрации Ni в пирите.

Считается, что на начальных стадиях метаморфизма золото, связанное с органическим веществом и син- и диагенетическим пиритом, содержащимся в углеродистых толщах, может высвобождаться и отлагаться в самородном виде (Коробейников, 1985; Сазонов и др., 2011; Snachev, Rassomakhin, 2024). Однако кларки золота во вмещающих породах, которые наблюдаются на изученном участке, на три и более порядков ниже, чем в описанных рудах и составляют 10 мг/т в углеродистых сланцах (Ketris M.P., Yudovich Ya.E., 2009), 5–11 мг/т в ультрамафитах (Boyle, 1979) и 15 мг/т в вулканических породах (Moss, Scott, 2001). Таким образом, для извлечения количества золота, необходимого для формирования месторождения, требуется гидротермальная переработка очень значительного объема пород при достаточном количестве флюида.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коренные руды Южно-Сухтелинского участка на Южном Урале представлены существенно кварцевыми жилами, отвечают золото-сульфидно-турмалин-кварцевому минеральному типу и парагенетически связаны с гранитной интрузией. В коренном залегании в кварцевых жилах установлено самородное золото двух генераций, отличающихся размером, морфологией, сульфидной ассоциацией и пробностью. Первая генерация умеренно высокопробного самородного золота характеризуется крупными размерами, прожилковидной морфологией и ассоциирует с агрегатами сульфидов и турмалина, неравномерно распределенными в объеме кварцевых жил. Вторая генерация весьма высокопробного самородного золота формирует тончайшие включения и прожилки в оксигидроксидах Fe и вторичных сульфидах меди, псевдоморфно заместивших первичные сульфиды под воздействием экзогенных факторов. По данным онтогенетических наблюдений и применения минеральных термоме-

тров, основанных на содержании Se в пирите и Ga, Ge в сфалерите, продуктивная минеральная ассоциация жил образовалась в температурном интервале 420–226 °С.

ЛИТЕРАТУРА

- Бабкин В.В., Шалагинов Э.В., Малолетко И.Г. и др. (1971) Отчет о результатах геолого-съёмочных работ на площади планшетов № 40-84-Б; № 41-61-В, № 73-А, проведенных Сухтелинским геолого-съёмочным отрядом в Верхне-Уральском и Уйском р-нах Челябинской обл. в 1966–71 гг. м-б 1:50 000. Челябинск, УГУ, 467 с.
- Коробейников А.Ф. (1985) Особенности распределения золота в породах черносланцевых формаций. *Геохимия*, 12, 1747–1757.
- Коробейников А.Ф., Черняева Е.И. (1987) Поведение золота при формировании зональных дайковых тел габбро-диабазов. *Доклады АН СССР*, 292(3), 680–684.
- Крейгер В.М., Аристов В.В., Вольнский И.С. (1958) Поведение золота в зоне окисления золото-сульфидных месторождений. М., Госгеотехиздат, 268 с.
- Мозгова Н.Н. (1975) Об изоморфизме в сульфидах и их аналогах / Изоморфизм минералов. М., Наука, 86–113.
- Мосейчук В.М., Яркова А.В., Михайлов И.Г., Кашина Л.В., Сурин Т.Н., Плохих Н.А., Цин Д.Ф. (2017) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Южно-Уральская. Лист N-40-XXIV. Объяснительная записка. М., ВСЕГЕИ, 127 с.
- Овчинников Л.Н. (1990). Прикладная геохимия. М., Недра, 1990, 246 с.
- Пантелеева А.В., Сначёв А.В., Панкратьев П.В., Тюрин А.М., Рассомахин М.А., Пантелеев В.С., Кисиль Р.С. (2023) Черные сланцы Кумакского рудного поля (геология, петрохимия, рудоносность). Оренбург, ООО «Типография «Агентство Пресса», 112 с. https://doi.org/10.31084/978-5-6051011-2-3_Kumak_2023
- Пальянова Г.А., Савва Н.Е., Журавкова Т.В. Колова Е.Е. (2016) Минералы золота и серебра в пиритах малосульфидных руд месторождения Джульетта (северо-восток России). *Геология и геофизика*, 57(8), 1488–1510. <https://doi.org/10.15372/GiG20160805>
- Петров В.И., Шалагинов А.Э., Пунегов Б.Н., Горлова Л.И., Забелкина Л.Г., Григорова Т.Б., Нокольский В.Ю., Шалагинова Т.И., Петрова А.С., Серeda В.В. (2003) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Южноуральская. Лист N-41-VII (Миасс). Объяснительная записка. М., ВСЕГЕИ, 167 с.
- Петровская Н.В. (1973) Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). М., Наука, 349 с.

- Плотинская О.Ю., Чугаев А.В., Бондарь Д.Б., Абрамова В.Д. (2019) Минералого-геохимические особенности руд Кедровско-Ирокиндинского рудного поля (Северное Забайкалье). *Геология и геофизика*, 60(10), 1407–1432. <https://doi.org/10.15372/GiG2019064>
- Пужаков Б.А., Шох В.Д., Шулькина Н.Е. и др. (2018) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Южно-Уральская. Лист N-41-XIII (Пласт). Объяснительная записка. М., ВСЕГЕИ, 205 с.
- Пучков В.Н. (2000) Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа, ГИЛЕМ, 146 с.
- Пучков В.Н. (2010) Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа, ДизайнПолиграфСервис, 280 с.
- Сазонов В.Н., Коротеев В.А., Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Великанов А.Я. (2011) Золото в «черных сланцах» Урала. *Литосфера*, (4), 70–92.
- Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А. (2001) Месторождения золота Урала. Екатеринбург, УГГА, 622 с.
- Сначев А.В., Пучков В.Н., Савельев Д.Е., Сначев В.И. (2006) Геология Арамилско-Сухтелинской зоны Урала. Уфа, ДизайнПолиграфСервис, 176 с.
- Тевелев А.В., Артюшкова О.В., Борисенко В.И. (1998) Новые данные о возрасте и структуре палеозойских комплексов Сухтелинской зоны на восточном склоне Южного Урала. *Бюллетень Московского общества испытателей природы*, 73(5), 63–65.
- Тевелев А.В., Кошелева И.А., Бурштейн Е.Ф. и др. (2018) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Южно-Уральская. Лист N-41-XIX (Варна). Объяснительная записка. М., Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 236 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (1988) Геохимия черных сланцев. Л., Наука, 272 с.
- Auclair G., Fouquet Y., Bohn M. (1987) Distribution of selenium in high-temperature 651 hydrothermal sulfide deposits at 13°N, East Pacific Rise. *The Canadian Mineralogist*, 25, 577–588.
- Belousov I., Large R.R., Meffre S., Danyushevsky L.V., Steadman J., Beardmore T. (2016) Pyrite compositions from VHMS and orogenic Au deposits in the Yilgarn Craton, Western Australia: Implications for gold and copper exploration. *Ore Geology Reviews*, 79, 474–499. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.04.020>
- Boyle R.W. (1979) The geochemistry of gold and its deposits. *Geological Survey of Canada Bulletin*, 280, 584 p
- Chutas N.I., Kress V.C., Ghiorso M.S., Sack R.O. (2008) A solution model for high-temperature PbS-AgSbS₂-AgBiS₂ galena. *American Mineralogist*, 93, 1630–1640. <https://doi.org/10.2138/am.2008.2695>
- Cook N. (1997) Bismuth and bismuth – antimony sulphosalts from neogene vein mineralisation, Baia Borşa Area, Maramureş, Romania. *Mineralogical Magazine*, 61, 387–409. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.406.06>
- Cook N., Ciobanu C., Pring A. Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky L., Saini-Eidukat B., Melcher F. (2009) Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICPMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(16), 4761–4791. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.045>
- Frenzel M., Hirsch T., Gutzmer J. (2016) Gallium, germanium, indium, and other minor and trace elements in sphalerite as a function of deposit type – A meta-analysis. *Ore Geology Reviews*, 76, 52–78. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.12.017>
- George L., Cook N., Ciobanu C. (2016) Partitioning of trace elements in co-crystallized sphalerite–galena–chalcopyrite hydrothermal ores. *Ore Geology Reviews*, 77, 97–116. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.02.009>
- George L., Cook N., Ciobanu C., Wade B. (2015) Trace and minor elements in galena: A reconnaissance LA-ICP-MS study. *American Mineralogist*, 100, 548–569. <https://doi.org/10.2138/am-2015-4862>
- Huston D.L., Sie S.H., Suter G.F., Cooke D.R. Both R.A. (1995) Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits; Part I: Proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite, and Part II, Selenium levels in pyrite; comparison with delta 34 S values and implications for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems. *Economic Geology*, 90(5), 1167–1196 <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.5.1167>
- Keith M., Smith D., Jenkin G., Holwell D., Dye M. (2018) A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: Insights into ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*, 96, 269–282. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.07.023>
- Ketris M.P., Yudovich Ya.E. (2009) Estimations of clarkes for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 78(2), 135–148. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.01.002>
- Liu H., Chang L.L.Y. (1994) Phase relations in the system PbS–PbSe–PbTe. *Mineralogical Magazine*, 58(393), 567–578. doi:10.1180/minmag.1994.058.393.04
- Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V., (2009) Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian Yaman-Kasy volcanic-hosted massive sulfide deposit (Southern Urals, Russia) using Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS). *Economic Geology*, 104(8), 1111–1141. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.8.1111>
- Moss R., Scott S.D. (2001). Gold content of Eastern Manus basin volcanic rocks: implications for enrichment in associated hydrothermal precipitates. *Economic Geology*, 96, 91–107. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.1.91>
- Renock D., Becker U. (2011) A first principles study of coupled substitution in galena. *Ore Geology Reviews*, 42, 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.04.001>

Revan M.K., Genc Y., Maslennikov, V.V., Maslennikova, S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V. (2014) Mineralogy and trace-element geochemistry of sulfide minerals in hydrothermal chimneys from the Upper-Cretaceous VMS deposits of the Eastern Pontide orogenic belt (NE Turkey). *Ore Geology Reviews*, 63, 129–149. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.006>

Snachev A.V., Rassomakhin M.A. (2024) Gold and platinum group element occurrence related to black shale formations in the Southern Urals (Russian Federation): a review. *Minerals*, 14, 1283. <https://doi.org/10.3390/min14121283>

REFERENCES

Auclair G., Fouquet Y., Bohn M. (1987) Distribution of selenium in high-temperature 651 hydrothermal sulfide deposits at 13°N, East Pacific Rise. *The Canadian Mineralogist*, 25, 577–588.

Babkin V.V., Shalaginov E.V., Maloletko I.G. et al. (1971) Report on results of geologic survey on a scale of 1 : 50 000 within sheets nos. 40-84-B, 41-61-B, and -73-A carried out by the Sukhtelya geological survey team in the Verkhneuralsk and Uy districts of the Chelyabinsk region in 1966–1971. Chelyabinsk, UGU, 467 p. (in Russian)

Belousov I., Large R.R., Meffie S., Danyushevsky L.V., Steadman J., Beardsmore T. (2016) Pyrite compositions from VHMS and orogenic Au deposits in the Yilgarn Craton, Western Australia: Implications for gold and copper exploration. *Ore Geology Reviews*, 79, 474–499. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.04.020>

Boyle R.W. (1979) The geochemistry of gold and its deposits. Geological Survey of Canada Bulletin, 280, 584 p

Chutas N.I., Kress V.C., Ghiorso M.S., Sack R.O. (2008) A solution model for high-temperature PbS-AgSbS₂-AgBiS₂ galena. *American Mineralogist*, 93, 1630–1640. <https://doi.org/10.2138/am.2008.2695>

Cook N. (1997) Bismuth and bismuth – antimony sulphosalts from neogene vein mineralisation, Baia Borșa Area, Maramureș, Romania. *Mineralogical Magazine*, 61, 387–409. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.406.06>

Cook N., Ciobanu C., Pring A. Skinner W., Shimizu M., Danyushevsky L., Saini-Eidukat B., Melcher F. (2009) Trace and minor elements in sphalerite: a LA-ICPMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(16), 4761–4791. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.05.045>

Frenzel M., Hirsch T., Gutzmer J. (2016) Gallium, germanium, indium, and other minor and trace elements in sphalerite as a function of deposit type – A meta-analysis. *Ore Geology Reviews*, 76, 52–78. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.12.017>

George L., Cook N., Ciobanu C. (2016) Partitioning of trace elements in co-crystallized sphalerite–galena–chalcopyrite hydrothermal ores. *Ore Geology Reviews*, 77, 97–116. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.02.009>

George L., Cook N., Ciobanu C., Wade B. (2015) Trace and minor elements in galena: A reconnaissance LA-ICP-MS study. *American Mineralogist*, 100, 548–569. <https://doi.org/10.2138/am-2015-4862>

Huston D.L., Sie S.H., Suter G.F., Cooke D.R. Both R.A. (1995) Trace elements in sulfide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits; Part I: Proton microprobe analyses of pyrite, chalcopyrite, and sphalerite, and Part II, Selenium levels in pyrite; comparison with delta 34 S values and implications for the source of sulfur in volcanogenic hydrothermal systems. *Economic Geology*, 90(5), 1167–1196 <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.5.1167>

Keith M., Smith D., Jenkin G., Holwell D., Dye M. (2018) A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: Insights into ore-forming processes. *Ore Geology Reviews*, 96, 269–282. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.07.023>

Ketris M.P., Yudovich Ya.E. (2009) Estimations of clarkes for carbonaceous biolithes: world averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 78(2), 135–148. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.01.002>

Korobeinikov A.F. (1985) Features of gold distribution in rocks of black shale formations. *Geokhimiya (Geochemistry)*, 12, 1747–1757 (in Russian)

Korobeinikov A.F., Chernyaeva E.I. (1987) Behavior of gold during the formation of zonal gabbrodiabase dike bodies. *Doklady AN SSSR (Doklady of the Academy of Sciences of the USSR)*, 1987, 292(3), 680–684 (in Russian).

Kreyter V.M., Aristov V.V., Volynsky I.S. (1958) Behavior of gold in oxidation zone of gold-sulfide deposits. Moscow, Gosgeoltekhizdat, 268 p. (in Russian)

Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V., (2009) Study of trace element zonation in vent chimneys from the Silurian Yaman-Kasy volcanic-hosted massive sulfide deposit (Southern Urals, Russia) using Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS). *Economic Geology*, 104(8), 1111–1141. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.104.8.1111>

Moseychuk V.M., Yarkova A.V., Mikhailov I.G., Kashina L.V., Surin T.N., Plokhikh N.A., Tsin D.F. (2017) State geologic map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200 000. South Urals series. Sheet N-40-XXIV. Explanatory note. Moscow, VSEGEI, 127 p. (in Russian)

Moss R., Scott S.D. (2001). Gold content of Eastern Manus basin volcanic rocks: implications for enrichment in associated hydrothermal precipitates. *Economic Geology*, 96, 91–107. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.96.1.91>

Mozgova N.N. (1975) About isomorphism in sulfides and their analogs. In: *Isomorphism of minerals (Izomorfizm mineralov)*. Moscow, Nauka, 86–113 (in Russian)

Ovchinnikov L.N. (1990). Applied geochemistry. Moscow, Nedra, 1990. 246 p. (in Russian)

Panteleeva A.V., Snachev A.V., Pankratiev P.V., Tyurin A.M., Rassomakhin M.A., Panteleev V.S., Ki-

sil R.S. (2023) *Black shales of the Kumak ore field (geology, petrochemistry, ore bearing capacity)*. Orenburg, OOO "Tipografiya "Agentstvo Pressa", 112 p. (In Russian).

Palyanova G.A., Savva, N.E., Zhuravkova T.V., Kolova E.E. (2016) Gold and silver minerals in low-sulfidation ores of the Julietta deposit (northeastern Russia). *Russian Geology and Geophysics*, 57(8), 1171–1190. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.08.005>

Petrov V.I., Shalaginov A.E., Punegov B.N., Gorlova L.I., Zabelkina L.G., Grigorova T.B., Nokolsky V.Yu., Shalaginova T.I., Petrova A.S., Sereda V.V. (2003) State geological map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200 000. Second edition. South Urals series. Sheet N-41-VII (Miass). Explanatory note. Moscow, VSEGEI, 167 p. (in Russian)

Petrovskaya N.V. (1973) *Native gold: general characteristic, typomorphism, problems of genesis*. Moscow, Nauka, 349 p. (in Russian)

Plotinskaya O.Y., Chugaev A.V., Bondar D.B., Abramova V.D. (2019) Mineralogy and geochemistry of ores of the Kedrovskoe-Irokinda ore field (Northern Transbaikalia). *Russian Geology and Geophysics*, 60(10), 1119–1140. <https://doi.org/10.15372/RGG2019064>

Puchkov V.N. (2000) *Palaeogeodynamics of the South and Central Urals*. Ufa. Gilem, 146 p. (in Russian)

Puchkov V.N. (2010) *Geology of the Urals and Cis-Urals (topical problems of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)*. Ufa, DizainPoligrafService, 280 p. (in Russian)

Puzhakov B.A., Shokh V.D., Shchul'kina N.E. et al. (2018) State geological map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200 000. Second edition. The South Urals series. Sheet N-41-XIII (Layer). Explanatory note. Moscow, VSEGEI, 205 p. (in Russian)

Renock D., Becker U. (2011) A first principles study of coupled substitution in galena. *Ore Geology Reviews*, 42, 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.04.001>

Revan M.K., Genc Y., Maslennikov, V.V., Maslennikova, S.P., Large R.R., Danyushevsky L.V. (2014) Mineralogy and trace-element geochemistry of sulfide minerals in hydrothermal chimneys from the Upper-Cretaceous VMS deposits of the Eastern Pontide orogenic belt (NE Turkey). *Ore Geology Reviews*, 63, 129–149. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.05.006>

Sazonov V.N., Koroteev V.A., Ogorodnikov V.N., Polenov Y.A., Velikanov A.Ya. (2011) Gold in «black shales» of the Urals. *Litosfera (Lithosphere)*, (4), 70–92 (in Russian)

Sazonov V.N., Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A., Polenov Y.A. (2001) Gold deposits of the Urals. Yekaterinburg, UGGA, 622 p. (in Russian)

Snachev A.V., Puchkov V.N., Savelyev D.E., Snachev V.I. (2006) *Geology of the Aramil-Sukhtelya zone of the Urals*. Ufa, DizainPoligrafService, 176 p. (in Russian)

Snachev A.V., Rassomakhin M.A. (2024) Gold and platinum group element occurrence related to black shale formations in the Southern Urals (Russian Federation): a review. *Minerals*, 14, 1283. <https://doi.org/10.3390/min14121283>

Tevelev A.V., Artyushkova O.V., Borisenok V.I. (1998) New data on the age and structure of the Paleozoic complexes of the Sukhtelya zone in the eastern slope of the South Urals. *Byulleten Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody (Bulletin of Moscow Society of Naturalists)*, 73(5), 63–65. (in Russian)

Tevelev A.V., Kosheleva I.A., Burshtein E.F. et al. (2018) State geological map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200 000. Second edition. South Urals series. Sheet N-41-XIX (Varna). Explanatory note. Moscow, VSEGEI, 236 p. (in Russian)

Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (1988) *Geochemistry of black shales*. Leningrad, Nauka, 272 p. (in Russian)

Информация об авторах

Брюхов Симеон Игоревич – инженер-исследователь, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., Россия; simeon.bryukhov@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

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

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; ayupova@mineralogy.ru

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

Information about the authors

Simeon I. Bryukhov – Engineer, South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk district, Russia; simeon.bryukhov@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

Ivan A. Blinov – Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology, Urals Branch, Russian Academy of Sciences, ivan_a_blinov@mail.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

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