

Минералогия, петрология

УДК 553.086

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.2.7>

Морфоструктурные особенности минеральных индивидов в рудах золотосульфидного типа. Забайкальский край

А.Г. Комарова^{1,3}, Т.А. Чикишева^{1,2,3}, В.И. Карпушкина^{1,2}¹ООО НПК «Спирит», г. Иркутск, Россия²Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия³Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. В статье содержатся результаты исследования морфоструктурных особенностей руды золотосульфидного типа – формы выделений рудных минералов, их распределение в пространстве и взаимоотношения между собой и с породообразующими минералами, которые напрямую отражают её технологические свойства. Также отражены результаты исследования дроблёной руды. Полученные данные позволяют обосновать выбор методов и разработать схемы технологической переработки руды.

Ключевые слова: самородное золото, золотосульфидные руды, текстурно-структурные характеристики руд.

Morphostructural features of mineral individuations in gold-sulphide type ores. Zabaikalskiy region

A.G. Komarova^{1,3}, T.A. Chikisheva^{1,2,3}, V.I. Karpushkina^{1,2}¹LLC SPC "Spirit", Irkutsk, Russia²Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia³Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Abstract. The article deals with the results of a study of morphostructural features of gold sulfide type ore: the forms of ore mineral deposits, their spatial distribution and relationship. The results of crushed ore research are also presented. The data obtained make it possible to choose methods for technological ore processing.

Keywords: native gold, gold sulfide type ore, textural and structural characteristics of ores.

Введение

В минерально-сырьевой базе Забайкальского края одним из ведущих полезных ископаемых является золото, которое, в соответствии со стратегией развития минерально-сырьевой базы до 2035 года, относится к полезным ископаемым второй группы, для которых достигнутые уровни добычи недостаточно обеспечены запасами разрабатываемых месторождений.

Преобладающее значение в сырьевой базе золота России и соответственно Забайкальского края занимают собственно золоторудные месторождения (в том числе месторождения золото-сульфидных руд) – более половины всех запасов золота, сосредоточенных на территории Забайкальского края заключены именно в них. На примере руд одного из таких месторождений изучены формы выделений рудных минералов, их распределение в пространстве и взаимоотношения с породообразующими минералами.

Исследования проводились с целью выявления минералого-технологических особенностей золотосульфидной руды, которые позволят произвести и убедительно обосновать выбор методов и технологических схем переработки исследуемой руды (Коннова, 2019), а также оценить качество получаемых в результате процессов обогащения промышленных продуктов.

Материалы и методы

Объектом исследований послужила усредненная технологическая проба руды, относящаяся к золотосульфидному малосульфидному типу руд.

Минералого-технологическое изучение руды проведено в минералогическом отделе ООО НПК «Спирит». Работа осуществлялась в соответствии с методическими руководствами Научного совета по методам минералогических исследований (Методические указания НСОММИ № 31, 1990; Методические рекомендации НСОММИ № 162, 2012; Методические рекомендации НСОММИ № 194, 2018) с применением бинокулярного стереомикроскопа Микромед МС-2-ZOOM 2CR, сканирующего электронного микроскопа MIRA3 LMN TESCAN в центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН и поляризационного микроскопа Olympus BX53-F в научно-учебной лаборатории

экспериментальной геологии геологического факультета ИГУ. Рентгенографический анализ выполнялся в центре коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН на дифрактометре ДРОН-3.0. Сокращённые названия минералов на фото даны в соответствии с работой Laurence N. Warr IMA–CNMNC approved mineral symbols (Warr LN., 2021).

Результаты и обсуждения

Результаты исследования прозрачных шлифов

Петрографические исследования вмещающих пород показали, что они представлены метаандезитами и метапесчаниками. Исследуемые породы имеют различную степень метасоматической и тектонической проработки, породы брекчированы и катаклазированы. Развита процессы сосюритизации, хлоритизации и карбонатизации.

Метапесчаники имеют преимущественно кварцевый состав: содержание обломков кварца составляет около 80 %, также присутствуют обломки полевых шпатов (20 %). Основная масса зёрен полевых шпатов изменена – по ним отмечается развитие глинистых фаз и серицита. Структура основной ткани метапесчаника среднезернистая. Отмечается мелкая идиоморфнозернистая вкрапленность пирита и кварца (рис. 1).

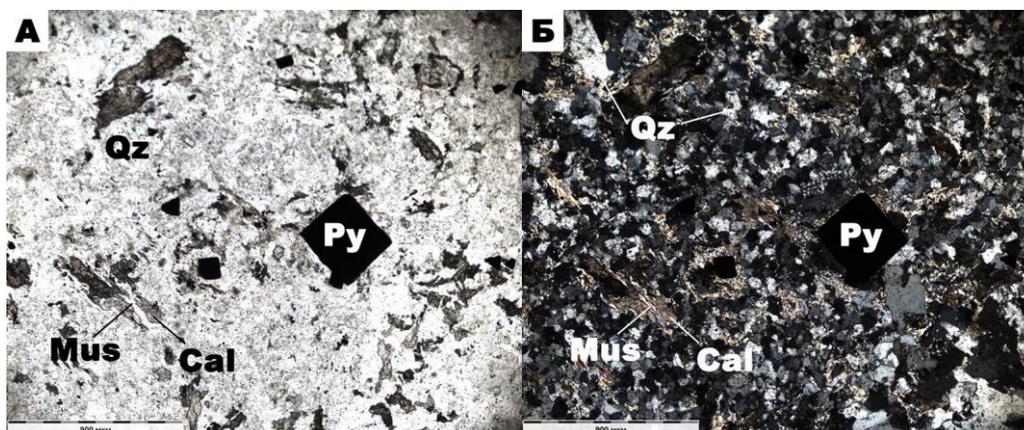


Рис. 1. Микрофотографии фрагмента метапесчаника. Прозрачный шлиф: А – анализатор выключен, Б – анализатор включен; Qz – кварц, Ms – мусковит, Cal – кальцит, Py – пирит.

Fig. 1. Microphotographs of a fragment of metasandstone. Thin section, polarization: A – PPL, B – XPL; Qz - quartz, Ms - muscovite, Cal – calcite, Py – pyrite.

Метаандезиты имеют неполнокристаллическую порфирированную структуру, местами реликтовую порфирированную. Вкрапленники, представлены как частично измененными андезитом (рис. 2) и амфиболами, так и псевдоморфозами глинистых минералов и серицита по плагиоклазам и хлорита по

амфиболам. На долю вкрапленников приходится 40 %. Основная ткань породы сильно изменена и состоит из частично сохранившихся микролитов кварца и полевых шпатов, в основном же визуализируются агрегаты хлорита и серицита.

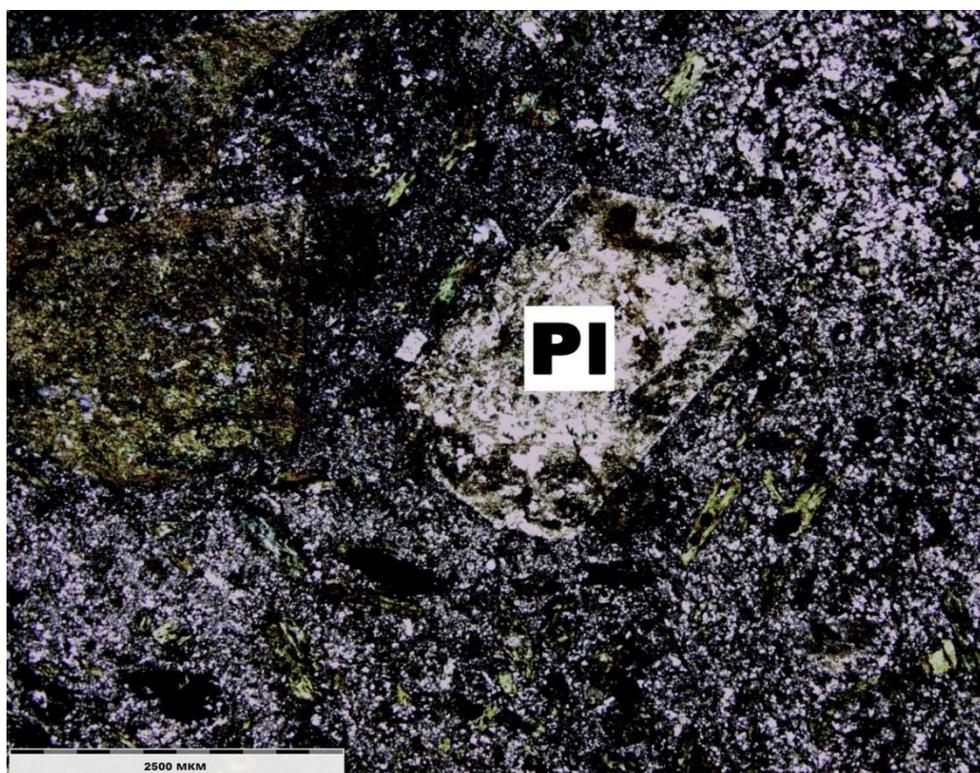


Рис. 2. Микрофотография фрагмента метаандезита. Прозрачный шлиф: анализатор включен; Pl – плагиоклаз.

Fig. 2. Microphotograph of a fragment of metaandesite. Thin section, XPL.

Исследуемые породы катаклазированы, все трещины выполнены гидротермальными минералами, формируя многочисленные прожилки, которые имеют различный состав: кварц-карбонатный, кварц-пиритовый, пирит-кварц-карбонатный, кварц-карбонат-эпидотовый, кварцевый, карбонатный и хлоритовый составы.

Результаты исследования полированных шлифов

Исследуемая руда имеет аллотриоморфнозернистую, участками гипидиоморфнозернистую структуру, текстура – вкрапленная, прожилково-вкрапленная и гнездово-вкрапленная. Рудные минералы в исследуемой пробе представлены пиритом, халькопиритом, арсенопиритом, сфалеритом, галенитом,

магнетитом, гематитом и самородным золотом. Рудные минералы рассеяны во вмещающих породах – образуют вкрапленность, а также входят в состав прожилков различного состава в виде вкрапленных и гнездовых выделений.

Пирит в исследуемых образцах визуализируется в виде неравномерной вкрапленности, прожилков и гнездовидных скоплений, который имеет идиоморфную (кубическую) и неправильные формы (рис. 3). Размер выделений пирита колеблется от 0.05 до 1 мм, с преобладанием в интервале от 0.1–0.3 мм. Мощность видимых скоплений достигает 20 мм. Редко в ассоциации с пиритом наблюдается арсенопирит.

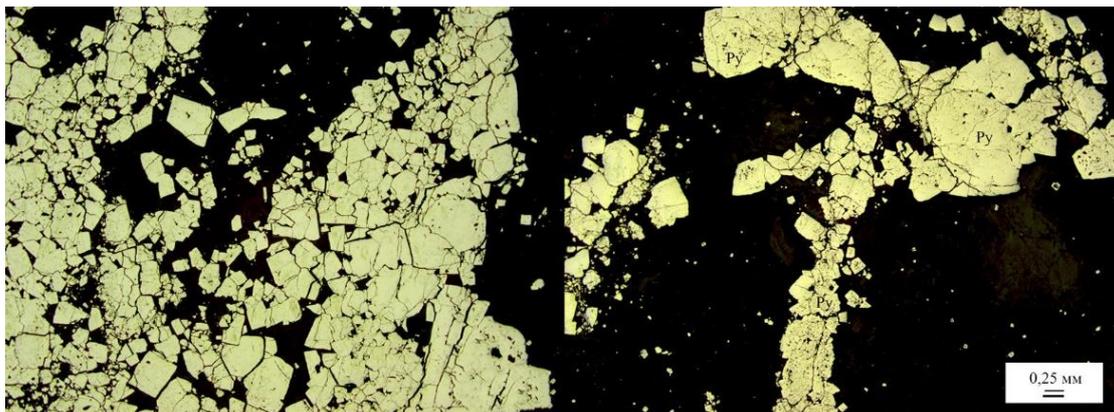


Рис. 3. Микрофотографии скоплений зёрен пирита (Py). Отражённый свет, анализатор выключен.

Fig. 3. Microphotographs of pyrite (Py) grain clusters. Reflected light, PPL.

Халькопирит находится в тесной ассоциации с пиритом, сфалеритом и галенитом (рис. 4). Образует агрегаты, скопления неправильной формы и прожилки. Также халькопирит наблюдается в виде эмульсионной вкрапленности в сфалерите размером от 0.002 до 0.06

мм. Отдельные зёрна халькопирита достигают 0.2 мм, а мощность прожилков — 0.1 мм. Иногда вокруг зёрен халькопирита наблюдаются тонкие халькозиновые каймы.

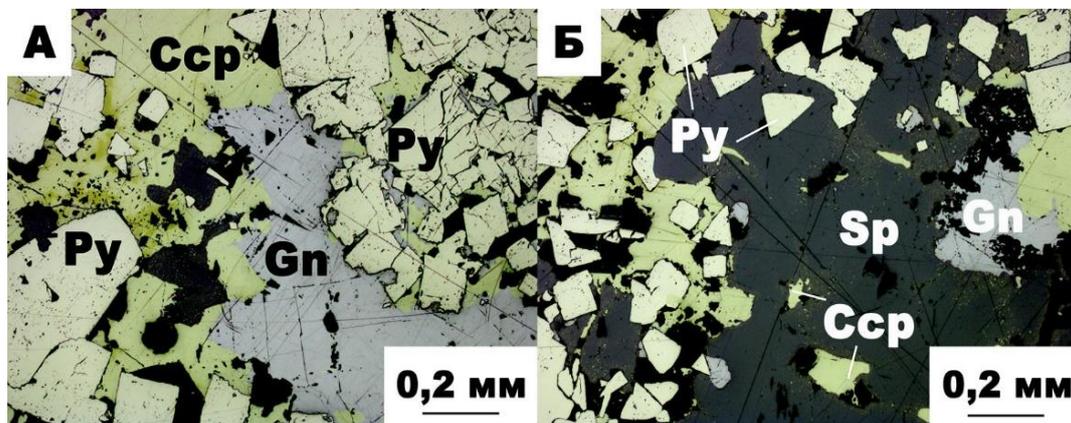


Рис. 4. Фотография СЭМ шлифовки зерна ксенокристалла оливина в пористой части периферии вулканической бомбы из пирокластического материала вулканического конуса Сяогушан.

Fig. 4. SEM photograph of grinding olivine xenocrystic grain in the porous part of the periphery of a volcanic bomb from pyroclastic material in the Xiaogushan volcanic cone.

Сфалерит и галенит (рис. 5) находятся в тесном сростании друг с другом и другими рудными минералами, образуют

ксеноморфные выделения, размер которых колеблется от 0.1 до 0.5 мм.

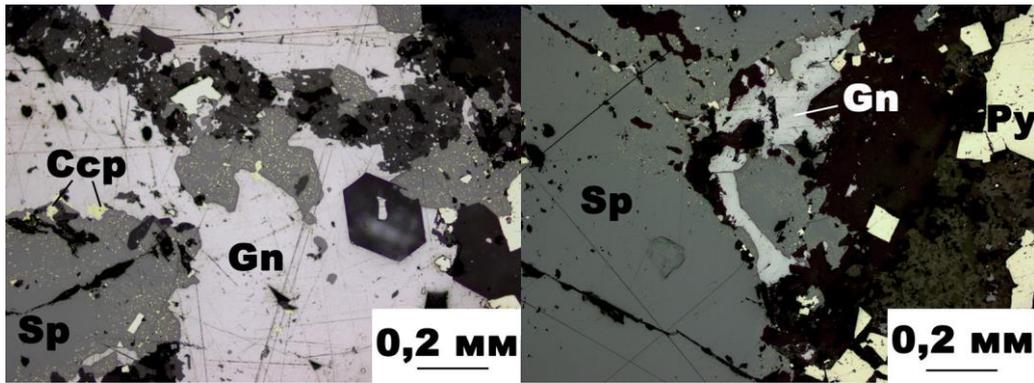


Рис. 5. Микрофотографии выделений рудных минералов. Отражённый свет, анализатор выключен. Сфалерит (Sp) с эмульсионной вкрапленностью халькопирита (Ccp) и в сростании с галени- том (Gn).

Fig. 5. Microphotographs of ore mineral assemblages. Reflected light, PPL. Sphalerite (Sp) with emul- sion phenocrysts of chalcopyrite (Ccp) and in associa- tion with galena (Gn).

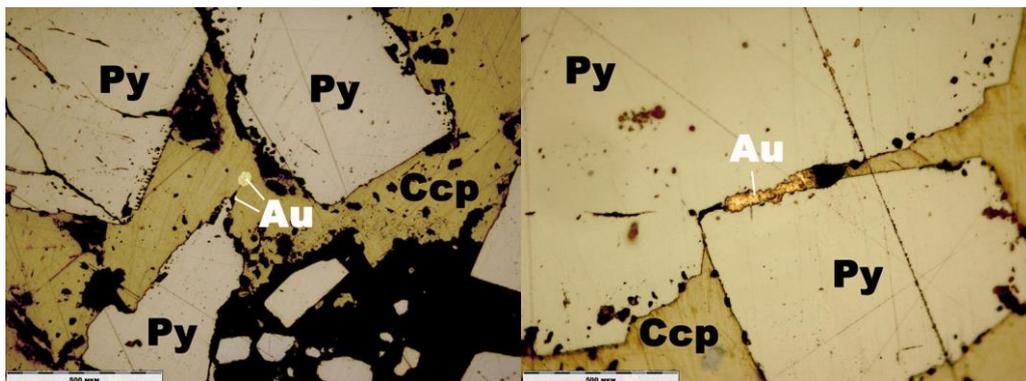


Рис. 6. Микрофотографии выделений рудных минералов. Отражённый свет, анализатор выключен. Включения самородного золота (Au) в халькопирите (Ccp) на контакте с пиритом (Py).

Fig. 6. Microphotographs of ore mineral assemblages. Reflected light, PPL. Native gold (Au) inclusions in chalcopyrite (Ccp) in contact with pyrite (Py).

Магнетит обнаружен в виде зёрен неправильной формы. Отмечаются структуры замещения магнетита гематитом. Размер зёрен магнетита достигает 1 мм. Гематит также обнаружен в виде пластинчатых агрегатов в сростании с магнетитом. Выделения гематита достигают 2 мм.

Главным рудным минералом в исследуемой пробе выступает самородное золото – оно визуализируется в виде микровключений в халькопирите на контакте с пиритом.

Вкрапления имеют размер от 5 до 20 микро- метров (рис. 6).

Измерения элементного состава зёрен зо- лота с помощью методов рентгеноспектраль- ного микроанализа показали в нём наличие примеси серебра – от 11.45 до 16.30 %.

Также при помощи рентгеноспектраль- ного микроанализа в аншлифах, изготовлен- ных из материала пробы установлены мине- ралы висмута – висмутин и галеновисмутит (рис. 7).

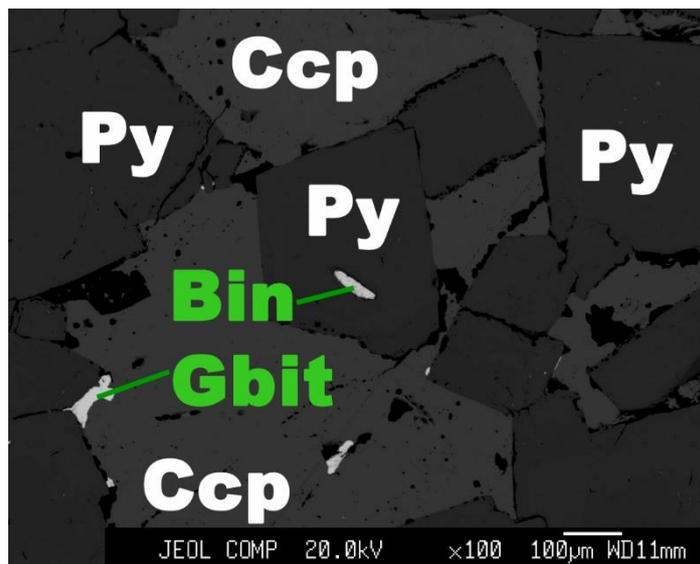


Рис. 7. Висмутин (Bin) и галеновисмутит (Gbin) в ассоциации с сульфидами: халькопиритом (Ccp) и пиритом (Py). Изображение в обратно рассеянных электронах.

Fig. 7. Bismuthite (Bin) and galenobismuthite (Gbin) in association with sulphides: chalcopyrite (Ccp) and pyrite (Py). Image in backscattered electrons.

Проведенные микроскопические исследования позволяют отнести исследуемые руды по минеральному составу к золото-сульфидной формации.

Оптико-минералогический анализ дроблёной руды

Минералогический анализ дроблёной руды (табл.) показал, что основная масса пробы (90.62 %) сложена кварцем, калиевыми полевыми шпатами, карбонатами, каолинитом, слюдами и обломками пород, которые представлены агрегатами кварца, карбонатов, слюд и хлоритов. Рудные минералы в

основном представлены пиритом (9.28 %), в меньшем количестве обнаружены сфалерит (0.03 %) и халькопирит (0.03 %). В подчинённом количестве (ед. зн.) обнаружены галенит, галеновисмутит, висмутин, магнетит и арсенопирит. Ценный компонент – самородное золото обнаружено также в единичных зёрнах. По данным рационального (фазового) анализа руды содержание золота в пробе составляет 1.9 ± 0.28 г/т. Пробность золота определена пробирным анализом и составляет 873 единицы, что позволяет отнести его к типу золота средней пробности (800–899 ед.).

Минеральный состав пробы

Т а б л и ц а

Table

Mineral composition of the sample

Минерал	Содержание, % мас.
Золото самородное	*Ед. зн.
Кварц	9.09
Калиевые полевые шпаты	1.87
Хлорит	2.73
Карбонаты (доломит, сидерит)	5.31
Пирит	9.28
Халькопирит	0.03
Арсенопирит	Ед. зн.
Галенит	Ед. зн.
Сфалерит	0.03
Магнетит	Ед. зн.
Висмутин	Ед. зн.
Галеновисмутит	Ед. зн.
Слюды	0.86
Каолинит	1.34

Гидроксиды железа	0.03
Обломки пород	69.42
Итого:	99.99

*единичные зёрна

Исследования характеристик свободного золота, извлечённого из рудного концентрата, показали, что они имеют неправильную форму, на поверхности наблюдаются следы механической деформации и пленки гидроксидов железа (рис. 8). Цвет тёмный,

золотисто-жёлтый. Края извилистые, заливообразные, у мелких зёрен более ровные. Блеск типичный металлический. По классификации Петровской Н.В. золото относится к типу очень мелкого (0.05–0.1 мм) и мелкого (0.1–0.9 мм) золота.

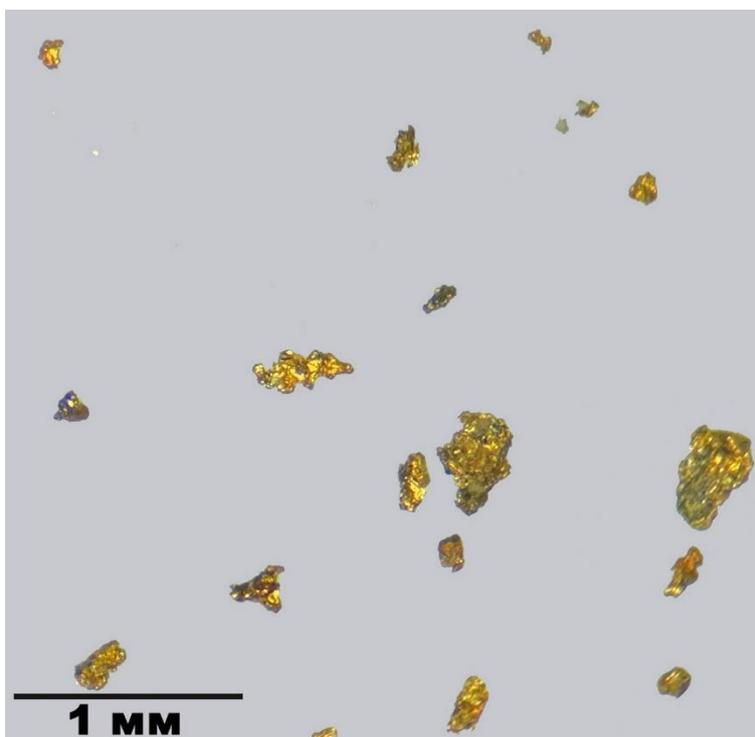


Рис. 8. Микрофотография монофракции самородного золота.

Fig. 8. Microphotograph of native gold grains.

Заключение

Данные, полученные при проведении оптико-минералогических исследований, позволили оценить минералого-технологические характеристики руд медистых песчаников. Исследованная проба руды относится к золотосульфидному малосульфидному типу руд, по содержанию золота – бедная (Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых (Золото рудное, 2007).

Основными рудными минералами пробы являются сульфиды (пирит, халькопирит,

галенит и сфалерит) и самородное золото, которые формируют рудную минерализацию. Рудная минерализация развита как во вмещающих породах (метапесчаниках и метаандезитах), так и в прожилках различного состава. Руды имеют поликомпонентный минеральный и сложный морфоструктурный составы, что в свою очередь позволяет отнести их труднообогатимому сырью с точки зрения технологической минералогии. При проведении операций дробления и измельчения будут образовываться различные по качеству сростки рудных минералов с породообразующими, а достичь селективного раскрытия рудных минералов можно только при

проведении операций тонкого измельчения (Смоляков, 2007).

Самородное золото является компонентом, определяющим промышленную ценность руды. Оно тесно ассоциирует с халькопиритом и иритом. В зёрнах золота присутствует значительная примесь серебра (12–16 %), что понижает его пробность (тип пробности золота – средний) и может отразиться на качестве полученных концентратов. Высвобожденное золото, полученное в результате процессов измельчения, относится к типам очень мелко и мелкого золота.

Данные, полученные при изучении морфоструктурных особенностей минералов руды и другие минералого-технологические характеристики, обусловили направления исследований для извлечения золота как гравитационными, так и флотационными методами, а также их сочетанием.

Исследование проведено при финансовой поддержке гранта Иркутского государственного университета для молодых ученых № 091-23-331 «Структурно-текстурные особенности минеральных индивидов в рудах золотосульфидного типа. Забайкальский край».

Литература

Коннова Н.И. Рудная и технологическая минералогия: учеб. пособие / Н.И. Коннова. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019. 176 с.

Методические указания НСОММИ № 31. Виды и последовательность минералогических исследований для обеспечения технологических работ. М.: ВИМС, 1990.

Методические рекомендации НСОММИ № 162. Оптико-минералогический анализ шлиховых и дробленых проб. М.: ВИМС, 2012.

Методические рекомендации НСОММИ № 194. Минераграфическое изучение руд. М.: ВИМС, 2018.

Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных иско-

паемых. Золото рудное // Федеральное государственное учреждение «Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых» (ФГУ ГКЗ) по заказу Министерства природных ресурсов Российской Федерации и за счет средств федерального бюджета. М.: 2007.

Смоляков А.Р. Раскрытие минералов при измельчении руды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), Горная книга, М.: 2007. № 8, С. 224–234.

Warr LN. IMA–CNMNC approved mineral symbols. Mineralogical Magazine. 2021;85(3):291-320. doi:10.1180/mgm.2021.43

References

Konnova N.I. Ore and technological mineralogy: textbook / N.I. Konnova. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2019. 176 p.

Types and sequence of mineralogical research to ensure technological works: Methodological instructions No. 31 / Scientific Council on Methods of Mineralogical Research (NSOMMI). – М.: VIMS, 1990.

Optical-mineralogical analysis of shlich and crushed samples: Methodological recommendations No. 162 / Scientific Council on Methods of Mineralogical Research (NSOMMI). М.: VIMS, 2012.

Mineralogical study of ores: Methodological Recommendations No. 194 / Scientific Council on Methods of Mineralogical Research (NSOMMI). М.: VIMS, 2018.

Methodological recommendations on the application of the Classification of reserves of deposits and inferred resources of solid minerals. Ore gold // Federal State Institution ‘State Commission for Mineral Reserves’ (FGU GKZ) by order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation and at the expense of the federal budget. М.: 2007.

Smolyakov A.R. Disclosure of minerals at ore grinding // Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal), Gornaya kniga, М.: 2007. No. 8, P. 224–234.

Warr LN. IMA–CNMNC approved mineral symbols. Mineralogical Magazine. 2021;85(3):291-320. doi:10.1180/mgm.2021.43

Комарова Анастасия Георгиевна,
ведущий инженер-минералог,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, корп.
2., оф. 305,
ООО НПК «Спирит»,
тел.: (3952) 42-85-62,

664003, Иркутск, ул. К. Маркса, 1,
Иркутский государственный университет,
преподаватель кафедры полезных ископаемых,
геохимии, минералогии и петрографии,
тел.: +7 (950) 120-19-61,
email: kag@spirit-irk.ru.

Komarova Anastasiya Georgievna,
Leading mineralogist engineer,
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,
LLC Research and Production Company Spirit,
tel.: (3952) 42-85-62,
664003, Irkutsk, K. Marx st., 1,
Irkutsk State University,
Lecturer of Department of Minerals, Geochemistry,
Mineralogy and Petrography,
tel.: +7 (950) 120-19-61,
email: kag@spirit-irk.ru.

Чикишева Татьяна Александровна,
кандидат геолого-минералогических наук,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, корп.
2., оф. 305,
руководитель минералогической группы, ООО
НПК «Спирит»,
664003, Иркутск, ул. К. Маркса, 1,
Иркутский государственный университет,
доцент кафедры полезных ископаемых, геохими,
минералогии и петрографии,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128,
Институт земной коры СО РАН,
младший научный сотрудник, отдел комплексного
использования минерального сырья,
тел.: (3952) 24-32-80,
email: cta@spirit-irk.ru.

Chikisheva Tatiana Alexandrovna,
Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy,
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,
Head of mineralogical department, LLC,
Research and Production Company Spirit,

tel.: (3952) 42-85-62,
664003, Irkutsk, K. Marx st., 1,
Irkutsk State University,
Associate Professor of the Department of Minerals,
Geochemistry, Mineralogy and Petrography,
tel.: (3952) 24-32-80,
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,
Institute of the Earth's Crust of SB RAS,
Department of Comprehensive Use of Mineral
Resources,
Junior research assistant,
email: cta@spirit-irk.ru

Карпушкина Виктория Ивановна,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, корп.
2., оф. 305,
ООО НПК «Спирит»,
ведущий инженер-минералог,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128,
Институт земной коры СО РАН,
ведущий инженер, лаборатория современной
геодинамики,
тел.: (3952) 24-32-80,
email: tvi@spirit-irk.ru.

Karpushkina Victoria Ivanovna,
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,
Leading mineralogist engineer, LLC Research
and Production Company Spirit,
tel.: (3952) 42-85-62,
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,
Institute of the Earth's Crust of SB RAS,
Leading engineer Laboratory of Modern Geodynamics,
email: tvi@spirit-irk.ru.