



Типоморфизм золота в метасоматитах золотосульфидного месторождения (Средний Урал)

А. В. Чумаков^{1,2}, О. В. Аликин², В. Н. Рудашевский², С. А. Удинцова²,
Е. Г. Панова¹, П. Н. Лейбгам³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия; *tchumakov.a.v@yandex.ru*

² ООО «ЦНТ Инструментс», Санкт-Петербург, Россия; *o.v.alikin@yandex.ru*

³ Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, Москва, Россия; *leib-na@yandex.ru*

Выявлены типоморфные особенности золота золотосульфидного месторождения (Средний Урал). Состав минералов определен с использованием микрорентгеноспектрального анализа. Крупные свободные частицы встречаются в виде серебристого золота (до 7.01 мас. % Ag). При изучении включений золота в сульфидах отмечено две разновидности по химическому составу: ртутное золото (до 2.87 мас. % Hg) и серебристое (до 6.28 мас. % Ag). В виде включения в пирите отмечена редкая находка теллурида золота – калаверита, средний химический состав которого (мас. %): Au = 45.20 ± 1.33 , Te = 54.18 ± 1.38 . Определены формы нахождения золота, его элементов-спутников (Ag, Hg, As, Cu, Pb и др.) и минералов-носителей (серебристое, ртутное золото, калаверит). Технология минералогических исследований с использованием электроимпульсной дезинтеграции позволила избежать переизмельчения исследуемых проб и выделить минеральные, микроминеральные формы золота и его спутников с помощью метода гидросепарации.

Ключевые слова: золото, электроимпульсная дезинтеграция, гидросепарация, типоморфизм минералов золота, элементы-спутники золота

Gold typomorphism in metasomatites of gold-sulfide deposit (Middle Urals, Trans-Ural megazone)

A. V. Chumakov^{1,2}, O. V. Alikin², V. N. Rudashevsky², S. A. Udintsova²,
E. G. Panova¹, P. N. Leibham³

¹ St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

² CNT Instruments, St. Petersburg, Russia

³ Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, Russia

Typomorphic features of gold of gold-sulfide deposit (Middle Urals) are revealed. Mineral compositions were determined using micro-X-ray spectral analysis. The studied coarse free particles occurs in the form of silver gold (up to 7.01 wt. % Ag). When studying gold inclusions in sulfides, 2 varieties by chemical composition of gold inclusions were noted: mercury gold (up to 2.87 wt. % Hg) and silver gold (up to 6.28 wt. % Ag). A rare find of gold telluride, calaverite, was noted as an inclusion in pyrite, the average chemical composition of which (wt. %) is: Au = 45.20 ± 1.33 , Te = 54.18 ± 1.38 . The forms of gold, its companion elements and carrier minerals have been determined. The technology of mineralogical research with the use of electric pulse disaggregation allowed to avoid overgrinding of the studied samples and to identify mineral, micromineral forms of gold and its satellites by means of hydroseparation method.

Keywords: gold, electric pulse disaggregation, hydroseparation, typomorphism of gold minerals, gold indicator elements

Введение

Золото относится к стратегическим полезным ископаемым, добыча которых необходима для пополнения запасов минерально-сырьевой базы (МСБ) страны. Российская Федерация обладает большими запасами золота: обеспеченность действующих добывающих предприятий балансовыми запасами собственно золоторудных месторождений составляет около 18 лет, комплексных — менее 33 лет, а россыпных — 6 лет (Государственный..., 2022). Для эффективного освоения этих запасов применяются передовые методы обогащения и извлечения: гравитационное и флотационное обогащение минералов золота, амальгамирование, цианирование золотосо-

держащих руд и концентратов, высокотемпературный хлорирующий обжиг с возгонкой золота в газовую фазу, автоклавное окисление золотосодержащих сульфидов, бактериальное выщелачивание и другие передовые методы (Гудков и др., 2004, 2010; Кучерский, 2007; Travis, 2011; Ernawati et al., 2018). Совершенствование технологий позволяет добиваться максимальной степени извлечения металла и сокращения процессов обогащения.

Для дальнейшего развития горнодобывающей отрасли необходимо постоянно пополнять МСБ золота за счет не только доразведки уникальных крупных месторождений, но и вовлечения относительно мелких объектов, которые можно рассматривать как допол-

Для цитирования: Чумаков А. В., Аликин О. В., Рудашевский В. Н., Удинцова С. А., Панова Е. Г., Лейбгам П. Н. Типоморфизм золота в метасоматитах золотосульфидного месторождения (Средний Урал) // Вестник геонаук. 2025. 1(361). С. 4–13. DOI: 10.19110/geov.2025.1.1

For citation: Chumakov A. V., Alikin O. V., Rudashevsky V. N., Udintsova S. A., Panova E. G., Leibham P. N. Gold typomorphism in metasomatites of gold-sulfide deposit (Middle Urals, Trans-Ural megazone). Vestnik of Geosciences, 2025, 1(361), pp. 4–13, doi: 10.19110/geov.2025.1.1



нительные источники этого металла. Одно из таких месторождений золотосульфидного типа находится на Среднем Урале, в 26 км к югу от г. Артемовского Свердловской области. С геологической точки зрения месторождение расположено близ Алапаевско-Челябинского разлома (Казаков и др., 2017). Оно сформировано в субмеридиональной полосе сланцев серицит-хлоритового состава (белоярская толща) и локализовано на контакте кварцевых диоритов (C_1) и габбро (C_1) с андезито-базальтовыми порфиридами и туфами (D_3). Среди сланцев встречаются линзы серпентинитов, габброидов и тектонизированных риолитов. Рудные тела представлены наиболее продуктивными золотоносными кварцевыми линзами и прилегающими минерализованными зонами во вмещающих породах (Серавкин, 2009). На исследуемом месторождении утверждены балансовые запасы золота по категориям $C_1 + C_2$ в количестве 2.275 т (Казаков и др., 2017).

Работами предшественников (Сазонов и др., 2001) установлено, что золото встречается совместно с главными минералами рудных тел: кварцем, карбонатами и сульфидами. Наиболее часто золото отмечено в ассоциациях с пиритом, халькопиритом, сфалеритом и теллуридами. Размеры золота очень сильно варьируют: от сотых долей до целых миллиметров. Средняя проба золота на месторождении — 927.1, из элементов-примесей отмечено исключительно серебро.

Целью работы являлось определение содержаний золота в метасоматитах месторождения, определение форм его нахождения, выявление элементов-спутников и сопутствующих минералов золота.

Материалы и методы исследований

Материал для исследования представлен комбинированной технологической пробой (500 кг), приготовленной из керна минерализованных метасоматитов. Для петрографических исследований также отобраны характерные образцы керна, которые оптически исследовались в виде шлифов и аншлифов на микроскопе Olympus BX51 с камерой Leica DC 300 и программным пакетом Autorano Giga. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) проводилась на растровом электронном микроскопе-микроанализаторе TM 3000 HITACHI и сканирующем электронном микроскопе JSM-6390 с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 (аналитик А. В. Антонов).

Для оценки количественного минерального состава выполнялся рентгенофазовый анализ (РФА) пробы на рентгеновском порошковом дифрактометре D2 Phaser (Bruker) в диапазоне углов 2θ от 5° до 90° . Обработка дифрактограммы осуществлялась в программе DIFFRAC.EVA, TOPAZ.

Содержание золота определялось методом атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС) после пробирной плавки. Общее и сульфидное содержание серы в исследуемой пробе измерялось методом газового анализа в лаборатории ALS Group (Москва). Для анализа распределения микроэлементов использовался метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, Aurora M90, ЕНИ ПГНИУ, г. Пермь, аналитик А. Ю. Пузик) после разложения пробы в царской водке.

Для определения форм нахождения золота и его спутников, их размерных характеристик из технологической пробы отобрана представительная навеска 20 кг. Пробоотбор проводился квартованием методом усеченного конуса после предварительного крупнокосового дробления части исходной пробы на щековой дробилке PEX250x750 до P100 – 60 мм и усреднения. Во избежание переизмельчения и заражения дробление пробы для минералогических исследований по 3D-технологии (Рудашевский и др., 2018) осуществлялось методом электроимпульсной дезинтеграции (ЭИД) на установке EPD Spark-2 (Рудашевский и др., 1991). ЭИД позволяет разрушать горные породы по границам зерен и кристаллов в минеральных агрегатах, минимизируя их переизмельчение (Юткин, 1986; Рудашевский и др., 1991; Зорин, 2022). Такой подход обеспечивает более точное и достоверное определение типоморфных характеристик золота и сопутствующих минералов (Рудашевский и др., 2018).

Продукты ЭИД расситованы мокрым способом на 10 фракций (мм): +5, –5 + 2.5, –2.5 + 1.0, –1.0 + 0.5, –0.5 + 0.315, –0.315 + 0.2, –0.2 + 0.125, –0.125 + 0.071, –0.071 + 0.045, –0.045. Далее из фракции –0.045 мм отделялся класс крупности –0.010 мм методом ультразвуковой седиментации (Личманова, 1972) в фарфоровых чашках с круглым днищем (Сапфир-2.8 ТТЦ, 2.8 л). Для определения содержаний золота и сопутствующих микроэлементов из 11 классов крупности отбиралась аналитическая навеска для атомно-абсорбционной масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Крупные фракции (–5.0 + 0.5 мм) изучались в аншлифах, а для концентрирования рудных минералов более тонких классов (–0.5 + 0.045 мм) использовалась технология разделения твердых частиц по плотности — метод гидросепарации (Гидросепаратор HS-11 и HS-технология) (Патент..., 2006; Lastra et al., 2005; Rudashevsky et al., 2001). Метод гидросепарации обеспечивает разделение материалов с различной плотностью за счет конкуренции масс частиц, захваченных восходящим слабым ламинарным водным потоком, — тяжелые частицы оседают на дно разделительной трубки, тогда как легкие фракции удаляются из нее. Применение гидросепарации для обогащения измельченных материалов позволяет получить «тяжелый» концентрат (HS-концентрат), который предоставляет статистически достоверную минералогическую информацию о пробе в пределах крупности слагающих ее частиц в диапазоне от <0.01 до 0.5 мм. Полученные концентраты представляют репрезентативные выборки зёрен рудных минералов в пределах узких классов крупности, из которых изготавливаются однослойные полированные шлифы для различных методов локального минералогического приборного анализа.

Результаты исследований

Золото и элементы-примеси

Петрографические исследования и результаты рентгенофазового анализа показали, что метасоматиты состоят (отн. %): из кварца (38.0), хлорита (24.0), альбита (19.4), кальцита (5.7), доломита (7.0) и серицита (5.9), что позволяет называть эти породы березитоподобными метасоматитами. В метасоматитах присутствуют сульфиды (первые %), которые представле-

ны главным образом пиритом. Кроме пирита в небольших количествах присутствуют зерна халькопирита, сфалерита и галенита. Встречаются индивиды самородного золота. Сульфидные минералы образуют текстуры от редко- до густовкрапленных и гнездообразных, а также полосчатые до массивных. Мелкозернистый молочно-белый кварц частично перекристаллизован (рис. 1).

Метасоматиты серицит-карбонат-альбит-хлорит-кварцевого состава характеризуются высокими содержаниями SiO_2 (51.1–58.4 мас. %) и K_2O (1.09–1.44 мас. %) относительно вмещающих пород белоярской толщи (48.77 и 0.2 мас. % соответственно). Содержания Na_2O , наоборот, минимальны в метасоматически измененных породах по сравнению с породами вмещающей рамы (2.11 и 4.61 мас. % соответственно).

Определены содержания золота и его элементов-спутников по классам крупности исследуемой пробы

(рис. 2, табл. 1). Среднее содержание золота составляет 1.9 г/т. Среднее содержание сульфидной серы в породах варьируется в пределах 0.5–1.5 мас. %. Содержание микроэлементов изменяется в пределах (г/т): Ag — 0.1–0.4, As — 6–14, Bi — 0.2–0.6, Te — 0.16–0.24, Hg — 0.17–0.38, Co — 27–49, Ni — 98–184, Cu — 70–170, Pb — 5–20, Zn — 74–124, Sb — 0.6–1.2.

Наблюдается неравномерное распределение золота по классам крупности, что обусловлено различной морфологией благородного металла в метасоматитах. Значительные содержания золота отмечены в классах (мм): $-0.315 + 0.2$ и $-0.045 + 0.010 = 2.21$ г/т и 2.00 г/т соответственно. Самые низкие содержания отмечены в классе $+5$ мм и -0.010 мм: в первом случае они обусловлены недостаточным вскрытием матрицы метасоматитов, а во втором, вероятно, природным размерным распределением сульфидов, с которыми связано золото крупностью более чем -0.010 мм.

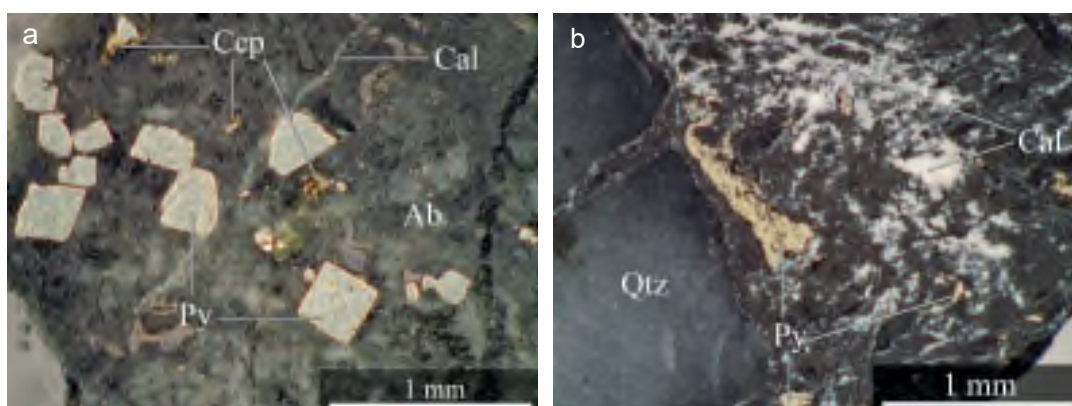


Рис. 1. Березитоподобные метасоматиты месторождения: а — вкрапленная минерализация (пирит), б — минерализация, связанная с кварц-карбонатными прожилками. Py — пирит, Ccp — халькопирит, Cal — кальцит, Ab — альбит, Qtz — кварц

Fig. 1. Characteristic samples of beresites from the deposit: а — disseminated mineralization (pyrite), б — mineralization associated with quartz-carbonate veins. Py — pyrite, Ccp — chalcopyrite, Cal — calcite, Ab — albite, Qtz — quartz

Таблица 1. Распределение элементов-спутников золота по классам крупности, г/т

Table 1. Grain size distribution of gold and coexisting elements, ppm

Элемент Element	Класс круп- ности, мм Size, mm	+5	-5+2.5	-2.5+1.0	-1.0+0.5	-0.5+0.315	-0.315+0.2	-0.2+0.125	-0.125+0.071	-0.071+0.045	-0.045+0.010	-0.010
Ag		0.10	0.14	0.18	0.17	0.24	0.27	0.38	0.25	0.39	0.40	0.21
As		7	10	6	9	8	9	14	9	9	8	4
Bi		0.25	0.44	0.23	0.31	0.38	0.23	0.48	0.59	0.55	0.47	0.31
Co		32	28	28	27	35	44	48	49	38	36	33
Cu		111	84	77	82	90	95	98	116	130	170	90
Hg		0.18	0.20	0.17	0.25	0.19	0.26	0.29	0.36	0.33	0.38	0.30
Ni		116	102	106	98	113	128	137	140	138	134	170
Pb		7	7	8	5	7	6	8	8	7	11	18
Sb		0.6	0.6	0.7	0.6	0.8	0.7	1.0	1.2	1.6	1.4	0.6
Te		0.18	0.16	0.21	0.17	0.19	0.20	0.22	0.19	0.23	0.22	0.24
Zn		79	75	77	74	76	81	80	87	83	92	121



Рис. 2. Распределение содержаний золота по классам крупности

Fig. 2. Gold grain size distribution

Морфология золота в метасоматитах месторождения

Морфологические характеристики частиц золота являются ключевыми для понимания их распределения и нахождения в пределах изучаемого месторождения. В березитоподобных метасоматитах золото отмечено в различных формах, включая свободные частицы, и золото, связанное с сульфидами. На рис. 3 представлены характерные морфологические типы самородного золота. Обнаруженные частицы золота имеют различный облик и относятся ко всем основным морфологическим типам — идиоморфному, неправильной формы и смешанным формам (Петровская, 1973; Николаева и др., 2023). Ниже рассмотрены морфологические особенности каждого типа: для свободного золота и связанного с сульфидами.

Свободное золото

Зерна представлены следующими типами самородного золота: таблитчатые, трещинные, комковидные, интерстициальные и гемиидиоморфные.

Таблитчатые золотины составляют большую часть рассмотренных золотин и, как правило, представляют собой изометричные или близкие к изометричным плохо образованные частицы с округленными в разной степени вершинами и ребрами размером 40–50 мкм, некоторые зерна имеют округлую форму (рис. 3, а–с).

Трещинные прожилковые обособления — вторые по встречаемости в изученной пробе, представлены удлиненными, вытянутыми индивидами с извилистыми контурами, образованными в результате заполнения золотом трещин в кварце и во вмещающей породе. Частицы золота представлены прожилковыми разновидностями и удлиненными золотинками (до 100 мкм) со сложной морфологией (рис. 3, d–f).

Комковидные золотины — частицы золота сложной формы, напоминающие комки пластичного вещества, характеризуются более плотной центральной частью, от которой в разные стороны отходят быстровыклинивающиеся ответвления или угловатые выступы (рис. 3, g–i), которые цементируют раздробленные минералы. Они достаточно характерны для золота, ассоциирующего с рудными минералами. Размер таких частиц 50–80 мкм.

Интерстициальные частицы — угловатые и уплощенные, размером 50–60 мкм, утопленные в центре,

с короткими островыклинивающимися выступами вдоль границ зерен ассоциирующих минералов (рис. 3, j, k).

Гемиидиоморфные золотины и их сростки — трещинно-прожилковые, комковидные или интерстициальные обособления с отдельными несовершенно развитыми ограниченными выступами и ответвлениями (рис. 3, l–n). Их размеры варьируют от 20 до 60 мкм.

Золото, связанное с сульфидами

Частицы золота наблюдаются в виде включений в пирите (рис. 4), относятся к смешанному морфологическому типу золота (Николаева и др., 2023). Преимущественно встречаются мелкие округлые каплевидные обособления (характерная морфологическая разновидность для вкраплений золота в сульфидах) (рис. 4, а), также наблюдаются единичные более крупные таблитчатые изометричные частицы с округленными гранями (рис. 4, b) и ребрами и отдельное включение плохо ограненной удлиненной золотины с элементами расщепленного строения у ее окончания (рис. 4, c).

Таким образом, самородное золото в изученных березитоподобных метасоматитах имеет разнообразную морфологию: встречаются таблитчатые, трещинные, комковидные, интерстициальные и гемиидиоморфные формы, а среди золота, связанного с сульфидами, преимущественно встречаются мелкие округлые каплевидные частицы самородного золота. Эти данные также подчеркивают необходимость тщательного контроля гранулометрического состава на всех этапах переработки руд для обеспечения эффективной и экономически целесообразной эксплуатации месторождения.

Для оценки размерных характеристик самородного золота в соответствии с предложенной системой Н. В. Петровской (1973) с дополнениями Л. А. Николаевой и соавторов (2023) выполнен статистический анализ размеров частиц в микронах (рис. 5); для классификации использовался параметр ECD — equivalent circle diameter. Стоит отметить, что размеры самородного золота варьируют в большом диапазоне: от первых мкм до 200 мкм.

Анализ размеров частиц самородного золота (рис. 5) указывает на значительную его долю (80.9 %) в диапазоне размеров частиц 1–50 мкм, что по пред-

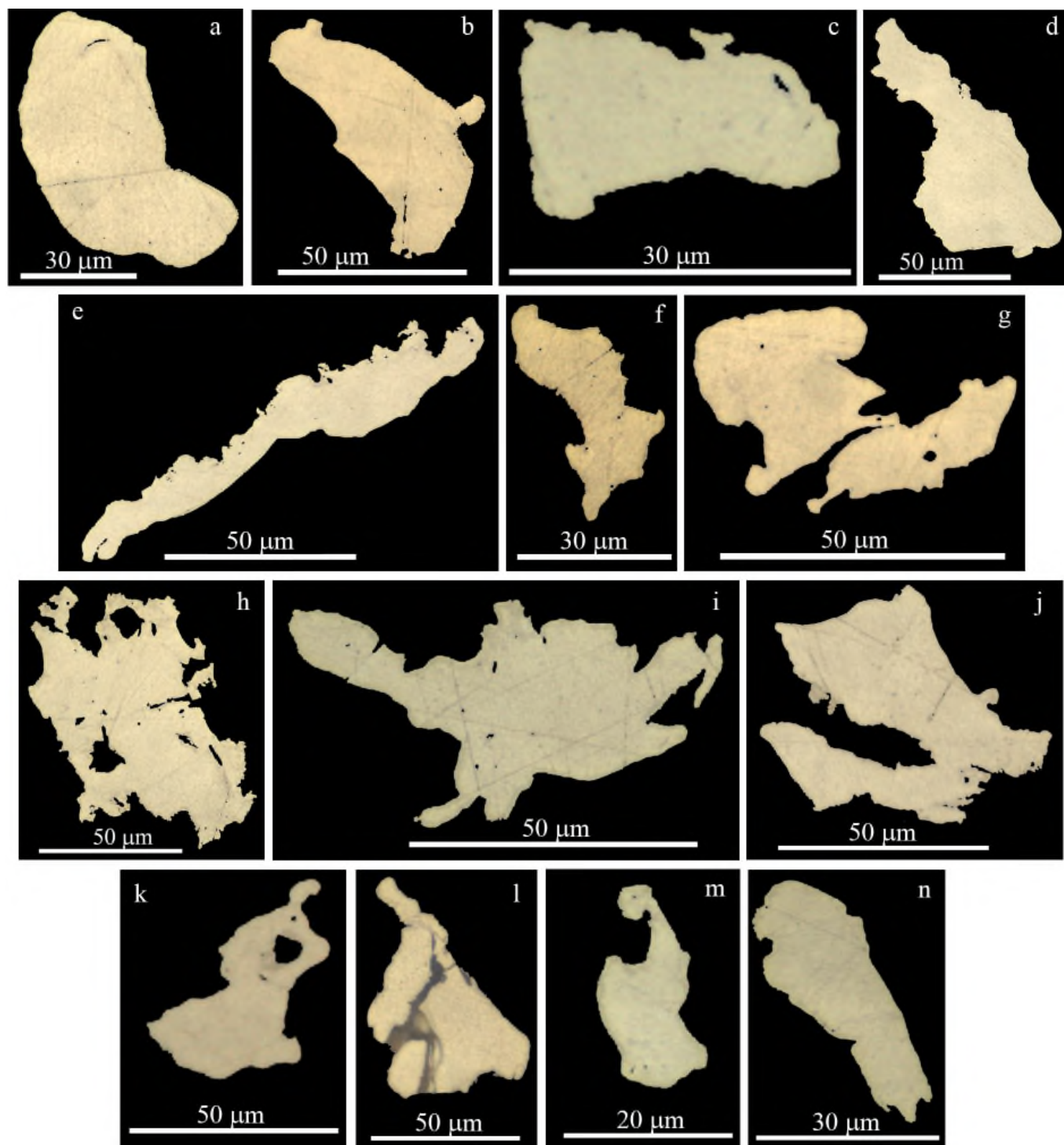


Рис. 3. Морфология самородного золота (фр. $-0.2 + 0.010$ мм): а–с — таблитчатые частицы, близкие к изометричным, d–e — золотины трещинно-прожилкового типа, f — удлиненная трещинно-прожилковая золотина, g–i — комковидные частицы золота, j–k — частицы золота интерстициального облика, l–n — гемиидиоморфные частицы самородного золота. HS-концентрат

Fig. 3. Morphology of native gold (fr. $-0.2 + 0.010$ mm): a–c — tabular particles close to isometric, d–e — fracture-strand gold particles, f — elongated fracture-strand gold particles, g–i — lump-like gold particles, j–k — interstitial gold particles, l–n — hemidiomorphic particles of native gold. HS-concentrate

ложенной классификации относится к пылевидному золоту. Эффективное извлечение частиц такой крупности может потребовать флотации или цианирования. Кроме того, порядка 13.7 % самородного золота характеризуется размером 50–100 мкм и относится к тонкому классу. Эта фракция, хоть и составляет меньшую долю, также важна для оценки обогатимости и

подбора специальных технологий и режимов обогащения.

Таким образом, преобладание пылевидных и тонких частиц самородного золота требует детального подхода к разработке и оптимизации технологических процессов для максимального извлечения драгоценного металла.

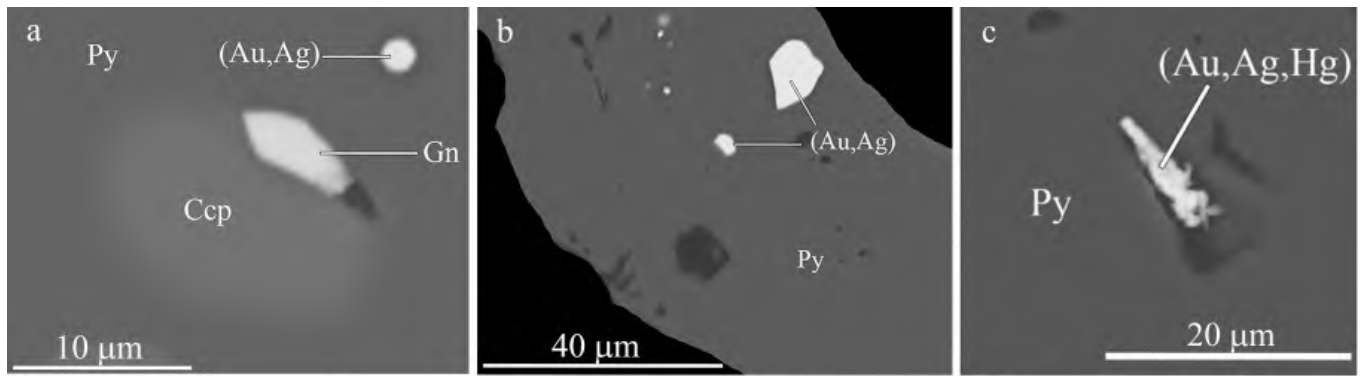


Рис. 4. Морфология частиц золота, связанных с сульфидами: а — вкрапление каплевидного кристалла золота в зерне пирита; б — вкрапления мелких округлых каплевидных кристаллов золота и таблитчатая, плохо образованная золотина с округленными гранями и ребрами в зерне пирита; с — удлиненная золотина с элементами расщепленного строения в пирите. HS-концентрат

Fig. 4. Morphology of gold particles associated with sulfides: a — phenocryst of droplet-like gold crystal in pyrite grain; b — phenocrysts of small rounded droplet-like gold crystals and tabular poorly formed gold with rounded faces and ribs in pyrite grain; c — elongated gold with elements of split structure in pyrite. HS-concentrate

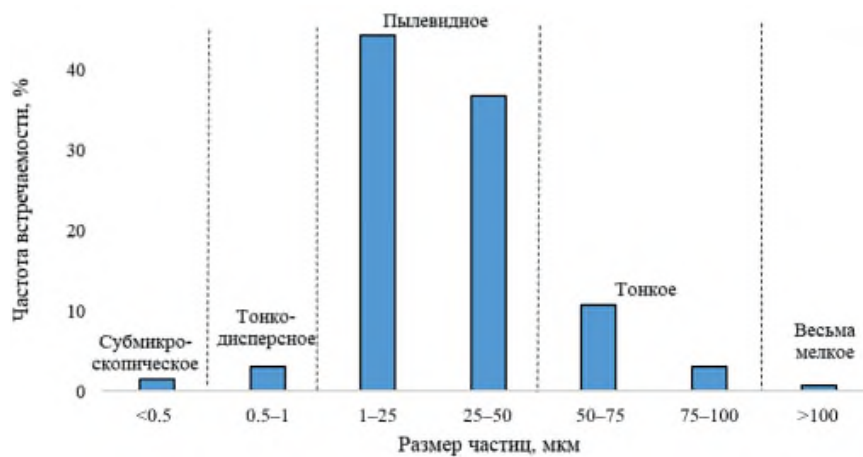


Рис. 5. Оценка встречаемости золота в метасоматитах месторождения по размеру частиц

Fig. 5. Estimation of gold occurrence in the metasomatites of the deposit of grain size distribution of native gold

Химический состав золота

Для исследования вариаций химического состава самородного золота (рис. 6) и его размеров проведена шлифовка и полировка зерен до их срединного сечения в пределах узких размерных фракций концентратов гидросепарации ($-0.125 + 0.071$, $-0.071 + 0.045$, $-0.045 + 0.010$ мм).

Свободное золото. По результатам химических анализов свободных зерен и агрегатов Au определен средний химический состав частиц самородного золота (мас. %): Au = 92.28 ± 0.40 , Ag = 7.01 ± 0.33 ; выборка (n) = 154.

Золото, связанное с сульфидами. При детальном исследовании химического состава включений в сульфидах отмечено две разновидности: серебристое и ртутистое золото. Химический состав серебристого и ртутистого золота (мас. %): Au = 93.03 ± 1.09 , Ag = 6.28 ± 0.97 , n = 46; и Au = 82.86 ± 0.61 , Ag = 13.89 ± 0.51 , Hg = 2.87 ± 0.17 , n = 106 соответственно.

Основным отличием золота в сульфидах от свободных частиц является сильная вариативность химического состава: встречается ртутистая разновидность,

а также более низкие содержания серебра, чем в свободных частицах.

Также отметим, что помимо самородного золота, обнаруженного в «тяжелом» концентрате гидросепарации (HS-концентрате), отмечено одно «тонкое» включение теллурида золота (ECD = 3 мкм) — калаверита (рис. 6, g, h). Его особенностями являются характерные кристаллографические очертания и соответствие состава стехиометрическому. Минерал также ранее описан на схожих месторождениях в работах предшественников (Спиридонов, 2010; Извекова и др., 2021). Средний химический состав калаверита (мас. %): Au = 45.20 ± 1.33 , Te = 54.18 ± 1.38 ; n = 6.

Все указанные минералы благородных металлов в изученной пробе хорошо вскрыты в результате применения ЭИД. Вклад серебристого золота в благороднометалльную минерализацию месторождения составляет 86.02 % от всех минералов золота, представленных в изучаемых метасоматитах. Ртутистое золото также распространено и составляет 11.98 %. Присутствие калаверита считается незначительным, что делает его редким минералом в балансе золота (~ 2.00 %).

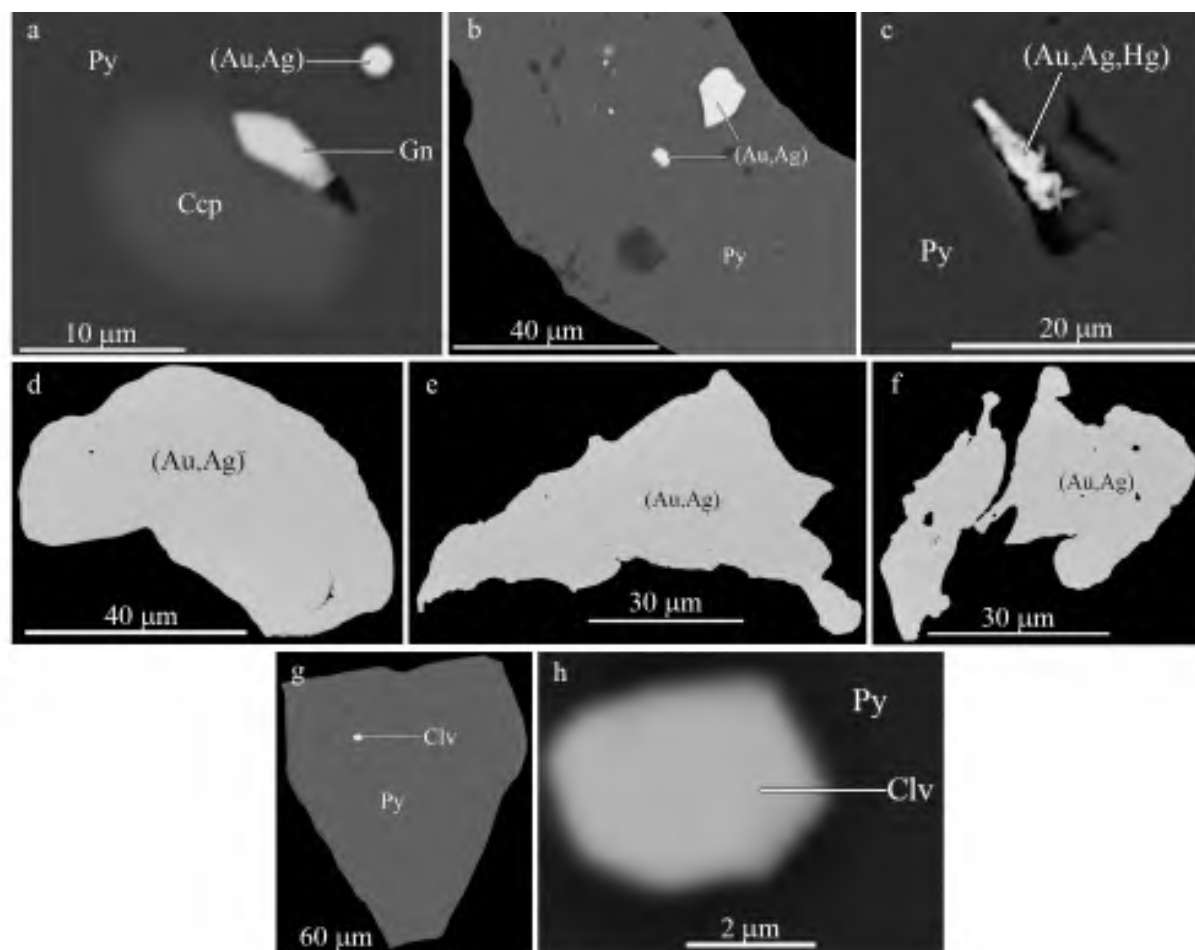


Рис. 6. Формы нахождения золота, полированный шлиф, BSE-фото. Ссп — халькопирит, Gn — галенит, Py — пирит, (Au, Ag) — серебристое золото, (Au, Ag, Hg) — ртутистое золото; Clv — калаверит; а–с — включения самородного золота в сульфидах, d–f — свободные частицы самородного золота, g–h — включение теллурида золота в пирите (калаверит). HS-концентрат

Fig. 6. Forms of gold of the deposit, polished section, BSE-image. Csp — chalcopirite, Gn — galena, Py — pyrite, (Au, Ag) — silver gold, (Au, Ag, Hg) — mercury gold; a–c — inclusions of native gold in sulfides, d–f — free particles of native gold, g–h — inclusion of gold telluride in pyrite (calaverite). HS-concentrate

Таблица 2. Химический состав золота из метасоматитов месторождения (рис. 6)

Table 2. Chemical composition of gold from metasomatites of the deposit (fig. 6)

№ образца / Sample №	Au	Ag	Hg	Te	Summary
a	93.82	5.32	–	–	99.14
b	93.74	5.83	–	–	99.57
c	83.99	13.25	2.38	–	99.62
d	88.27	11.63	–	–	99.90
e	90.23	9.85	–	–	100.08
f	93.17	6.47	–	–	99.64
g	43.27	–	–	56.73	100.00
h	42.90	–	–	56.78	99.68

Обсуждение результатов

В пределах золотосульфидного месторождения уточнена «продуктивная» сульфидная минерализация. Полученные данные согласуются с результатами работ по другим объектам Среднего Урала (Рудянско-Февральский узел), в пределах которых отмечаются схожие ряды окорудных изменений и минеральные ассоциации, с которыми связано золото. Для исследуемого месторождения характерно образование бере-

зитов и березитоподобных метасоматитов с сопутствующей им сульфидной минерализацией (пиритовая с незначительным количеством халькопирита, сфалерита, галенита).

На основании данных о содержании благородных металлов и микроэлементов, о количественной оценке зерен в аншлифах и HS-конcentратах, а также данных о составе самих минералов оценен минеральный баланс рудообразующих минералов (табл. 3).



Таблица 3. Содержания рудных минералов в метасоматитах месторождения

Table 3. Ore mineral contents in the metasomatites of the deposit

Минерал Mineral	Формула Formula	Содержание, мас. % Content, wt. %	Доля, % Fraction, %
Главные минералы / Main minerals			
Пирит / Pyrite	FeS ₂	1.286	97.05
Халькопирит / Chalcopyrite	CuFeS ₂	0.020	1.51
Сфалерит / Sphalerite	ZnS	0.015	1.13
Арсенопирит / Arsenopyrite	FeAsS	0.003	0.23
Галенит / Galena	PbS	0.001	0.08
Сумма / Sum		1.325	100.00
Минералы благородных металлов / Minerals of noble metals			
Серебристое золото / Silver-gold	(Au,Ag)	0.000181	86.02
Ртутистое золото / Mercury-gold	(Au,Ag,Hg)	0.000025	11.98
Калаверит / Calaverite	AuTe ₂	0.000004	2.00
Сумма / Sum		0.000211	100.00

По минеральному составу преобладает пирит (~ 97 %), в подчиненных количествах встречаются халькопирит (1.5 %) и сфалерит (1.1 %). Суммарное содержание сульфидов — 1.325 мас. % (табл. 2).

По содержанию сульфидов месторождения золота делят на малосульфидные (до 1–5 мас. %), умеренно сульфидные (5–20 мас. %) и высокосульфидные (более 20 мас. %) (Лодейщиков, 1999; Петровская, 1973; Секисов и др., 2011). Исследуемый объект по предложенной классификации следует отнести к малосульфидному типу золоторудных месторождений. Информация о количественном соотношении сульфидов в исследуемых породах имеет существенное влияние на выбор технологии обогащения для максимального извлечения золота. В случае малосульфидных месторождений наиболее целесообразно использовать гравитационно-цианидную схему обогащения или технологию прямого кучного выщелачивания.

Выводы

1. Метасоматиты месторождения состоят (отн. %): из кварца (38.0), хлорита (24.0), альбита (19.4), кальцита (5.7), доломита (7.0) и серицита (5.9), что позволяет их описать как березитоподобные метасоматиты. В метасоматитах присутствуют сульфиды (первые %), которые представлены главным образом пиритом и небольшим количеством халькопирита, сфалерита, галенита и арсенопирита.

2. Наиболее высокие содержания золота отмечены в классах (мм): $-0.315 + 0.2 = 2.21$ г/т и $-0.045 + 0.010 = 2.00$ г/т. В виде элементов-примесей обнаружены (г/т): Ag — 0.1–0.4, As — 6–14, Bi — 0.2–0.6, Te — 0.16–0.24, Hg — 0.17–0.38, Co — 27–49, Ni — 98–184, Cu — 70–170, Pb — 5–20, Zn — 74–124, Sb — 0.6–1.2.

3. Золото присутствует в самородной форме, в виде включений в сульфидах и в форме теллурида золота — калаверита (AuTe₂). В соответствии с классификацией, предложенной Н. В. Петровской, выявлены различные морфологические формы свободных частиц золота, включая таблитчатые, трещинные, комковидные, интерстициальные и гемиидиоморфные частицы. В сульфидах золото отмечено исключительно

но в пирите в виде преимущественно мелких округлых каплевидных обособлений. По размерным характеристикам порядка 81 % всего золота в метасоматитах относятся к пылевидному классу.

4. Химический состав золота варьирует в зависимости от морфологической разновидности: крупное свободное встречается в виде серебристого золота (до 7.01 мас. % Ag). При изучении включений золота в сульфидах отмечено две разновидности по химическому составу золотин: ртутистое золото (до 2.87 мас. % Hg) и серебристое (до 6.28 мас. % Ag). Стоит отметить, что зафиксированное в сульфидах тонкое серебристое золото менее серебристое, чем свободное. В виде включения в пирите отмечена редкая находка теллурида золота — калаверита, средний химический состав которого (мас. %): Au = 45.20 ± 1.33 , Te = 54.18 ± 1.38 .

5. Сделан расчет минерального баланса главных сульфидных минералов в метасоматитах и минералов золота. Среди главных рудных минералов преобладает пирит (~ 97 %), в незначительных количествах отмечены халькопирит, сфалерит, арсенопирит и галенит. Более 80 % золота в метасоматитах содержится в виде серебристого золота (Au, Ag), ~ 12 % — в виде ртутистого золота (Au, Ag, Hg), наименьший вклад в баланс золота вносит калаверит (AuTe₂) — всего 2 %.

6. Полученная информация о количественном соотношении сульфидов в исследуемых породах имеет существенное влияние на выбор технологии обогащения для максимального извлечения золота. Для обогащения золота из малосульфидных месторождений наиболее целесообразным является использование гравитационно-цианидной схемы обогащения или технологии прямого кучного выщелачивания.

Выражаем искреннюю признательность Д. М. Пастухову (ООО «ПГМИ», Екатеринбург) за предоставленную информацию о результатах тестирования извлечения благородных металлов методами гравитационного обогащения и кучного выщелачивания для месторождения и А. Ю. Пузику (ФГБОУ ВО «ПГНИУ», г. Пермь) за выполнение химических анализов на микроэлементы. Работа выполнена в Ресурсном центре микроскопии и микроанализа СПбГУ.

Литература / References

- Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевой базы Российской Федерации в 2021 году / Глав. ред. Д. Д. Тетенкин, Е. И. Петров. М., 2022. 626 с.
- State report on the state and use of the mineral resource base of the Russian Federation in 2021. Chief editors D. D. Tetenkin, E. I. Petrov. Moscow, 2022, 626 p. (in Russian)
- Гудков С. С., Рязанова И. И., Шкетова Л. Е., Емельянов Ю. Е. Биогидрометаллургическая переработка сульфидных руд // Цветные металлы. 2004. № 8. С 47–48.
- Gudkov S. S., Ryazanova I. I., Shketova L. E., Emelianov Yu. E. Biohydrometallurgical processing of sulfide ores. Non-ferrous metals, 2004, No. 8, pp. 47–48. (in Russian)
- Гудков А. С., Минеев Г. Г., Жучков И. А. Оценка автоклавного окисления сульфидных концентратов применительно к последующему сульфит-тиосульфатному выщелачиванию благородных металлов // Вестник ИрГТУ. 2010. № 3. С. 84–90.
- Gudkov A. S., Mineev G. G., Zhuchkov I. A. Evaluation of autoclave oxidation of sulfide concentrates as applied to subsequent sulfite-thiosulfate leaching of precious metals. Bulletin of IrSTU. 2010, No. 3, pp. 84–90. (in Russian)
- Зорин А. С. Электроимпульсная технология дробления твердых диэлектрических материалов. Факторы, оказывающие влияние на динамику разрядных процессов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13. № 3. С. 87–96. doi:10.37614/2949-1215.2022.13.3.009
- Zorin A. S. Electric pulse technology for crushing solid dielectric materials. Factors influencing the dynamics of discharge processes. Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical sciences, 2022, V. 13, No. 3, pp. 87–96. (in Russian)
- Извекова А. Д., Дамдинов Б. Б., Дамдинова Л. Б., Москвитина М. Л. Золото-теллуридная минерализация в рудах Пионерского золото-кварцевого месторождения (Восточный Саян, Россия) // Геология рудных месторождений. 2021. Т. 63. № 6. С. 498–519. DOI: 10.31857/S0016777021060022
- Izvekova A. D., Damdinov B. B., Damdinova L. B., Moskvitina M. L. Gold-telluride mineralization in ores of the Pionerskoye gold-quartz deposit (Eastern Sayan, Russia). Geology of ore deposits, 2021, V. 63, No. 6, pp. 498–519. (in Russian)
- Казаков И. И., Стороженко Е. В., Харитонов И. Н., Стефановский В. В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000 (издание второе). Серия Среднеуральская. Лист О-41-XXVI (Асбест). Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2017, 284 с. + 13 вкл.
- Kazakov I. I., Storozhenko E. V., Kharitonov I. N., Stefanovsky V. V., et al. State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1 : 200,000 (second edition). Middle Ural Series. Sheet O-41-XXVI (Asbestos). Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory, 2017, 284 p. + 13 incl.
- Кучерский Н. И. Современные технологии при освоении коренных месторождений золота. М.: Руда и металлы, 2007. 696 с.
- Kucherskiy N. I. Modern technologies in the development of primary gold deposits. Moscow: Ore and Metals. 2007, 696 p. (in Russian)
- Личманова А. И. Применение ультразвука в подготовке почв к механическому анализу // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 1972. Вып. 4. С. 42–47.
- Lichmanova A. I. Application of ultrasound in soil preparation for mechanical analysis. Bulletin of the Soil Institute named after V. V. Dokuchaev. 1972, 4, pp. 42–47. (in Russian)
- Лодейшичikov В. В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. Иркутск: Иргиредмет, 1999. 775 с.
- Lodeyshchikov V. V. Technology of gold and silver extraction from refractory ores. Irkutsk: Irgiredmet, 1999, 775 p. (in Russian)
- Николаева Л. А., Гаврилов А. М., Некрасова А. Н., Яблокова С. В., Шатилова Л. В., Позднякова Н. Н. Изучение самородного золота при геологоразведочных работах: Метод. рекомендации. Изд. второе, перераб. и доп. / Отв. ред. А. И. Черных. М.: ЦНИГРИ, 2023. 74 с.
- Nikolaeva L. A., Gavrilov A. M., Nekrasova A. N., Yablokova S. V., Shatilova L. V., Pozdnyakova N. N. Study of native gold in geological exploration. Methodical recommendations. Second edition, revised. and additional. Ed. A. I. Chernykh. Moscow: TsNIGRI, 2023, 74 p. (in Russian)
- Патент № 2281808. Гидравлический классификатор. Заявлено 08.12.2004. Опубликовано 20.08.2006. Бюл. № 23 / Н. С. Рудашевский, В. Н. Рудашевский. Patent No. 2281808. Hydraulic classifier. N. S. Rudashevsky, V. N. Rudashevsky; Claimed 08.12.2004. Published 20.08.2006. Bulletin No. 23. (in Russian)
- Петровская Н. В. Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). М.: Наука, 1973. С. 349.
- Petrovskaya N. V. Native gold (general characteristics, typomorphism, issues of genesis). Moscow: Nauka, 1973, p. 349. (in Russian)
- Рудашевский Н. С., Бураков Б. В., Лупал С. Д., Шулюяков А. Д., Курец В. И. Электроимпульсная дезинтеграция — оптимальная технология высвобождения ненарушенных зерен акцессорных минералов // Докл. АН СССР. 1991. Т. 319. № 1. С. 219–222.
- Rudashevsky N. S., Burakov B. V., Lupal S. D., Shuloyakov A. D., Kurets V. I. Electropulse disintegration is an optimal technology for releasing undisturbed grains of accessory minerals. Doklady Earth Sciences, 1991, V. 319, No. 1, pp. 219–222. (in Russian)
- Рудашевский Н. С., Рудашевский В. Н., Антонов А. В. Универсальная минералогическая технология исследования пород, руд и технологических продуктов // Региональная геология и металлогения. 2018. № 73. С. 88–102.
- Rudashevsky N. S., Rudashevsky V. N., Antonov A. V. Universal mineralogical technology for the study of rocks, ores and technological products. Regional Geology and Metallogeny, 2018, No. 73, pp. 88–102. (in Russian)
- Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Коротеев В. А., Поленов Ю. А. Месторождения золота Урала: Научное издание (второе, исправленное и дополненное). Екатеринбург: Изд-во УГГА, 2001. 622 с.
- Sazonov V. N., Ogorodnikov V. N., Koroteev V. A., Polenov Yu. A. Gold deposits of the Urals: Scientific publication (second, corrected and supplemented). Yekaterinburg: USMGA Publishing house, 2001, 622 p. (in Russian)



- Серавкин И. Б. Эндогенная металлогения золота // Геологический сборник № 8 / ИГ УНЦ РАН. Уфа, 2009. С. 164–176.
- Seravkin I. B. Endogenous metallogeny of gold. Geological collection No. 8. IG Ufa SC RAS, Ufa, 2009, pp. 164–176. (in Russian)
- Секисов Г. В., Соболев А. А., Нугай Е. В. Типы маломасштабных золоторудных месторождений Дальневосточного региона и основные направления их рационального освоения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 2. С. 192–201.
- Sekisov G. V., Sobolev A. A., Nigay E. V. Types of small-scale gold deposits in the Far Eastern region and the main directions of their rational development. Mining information and analytical bulletin, No. 2, 2011, pp. 192–201. (in Russian)
- Спиридонов Э. М. Обзор минералогии в ведущих типах Au-минерализации // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов: Труды Всеросс. (с междунар. уч.) науч. конф., посвящ. 80-летию Кольского НЦ РАН. Апатиты, 26–29 сентября 2010 г. / Ред. Ю. Л. Войтеховский. Апатиты: Изд-во К&М, 2010. 228 с.
- Spiridonov E. M. Review of mineralogy in the leading types of Au mineralization. Gold of the Kola Peninsula and adjacent regions. Proceedings of the All-Russian (with international participation) scientific conference dedicated to the 80th anniversary of the Kola SC RAS. Apatity, September 26–29, 2010. Ed. Yu. L. Voitekhovsky. Apatity: K&M Publishing House, 2010, 228 p. (in Russian)
- Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности // Машиностроение. СПб., 1986. 252 с.
- Yutkin L. A. Electrohydraulic effect and its application in industry. Mechanical engineering. St. Petersburg, 1986, 252 p. (in Russian)
- Ernawati R. et al. Study of the optimization of gold ore concentration using gravity separator (shaking table): case study for LS epithermal gold deposit in Artisanal Small scale Gold Mining (ASGM) Paningkaban, Banyumas, Central Java / 2018 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 212 012019
- Lastra R. Pric J., Cabri L. J. et al. Gold characterization of a sample from Malartic East (Québec) using concentration by hydroseparator // Proc. International Symposium on the Treatment of Gold Ores, Calgary, Alberta // Eds. by G. Deschênes, D. Houdin, L. Lorenzen. 2005. P. 17–29.
- Rudashevsky N. S., Rudashevsky V. N., Lupal S. D. Method for separating granular materials and device for carrying out said method // Patent Cooperation Treaty PCT/RU01/00123, Moscow, 20 April 2001, 10 May 2001. (Russian and English text).
- Travis J. M., Daniel W. K. Precious metal heap leach design and practice. In: SME Mining Engineering Handbook. Third Edition. 2011 Vol.1. Published 2011 by SME (1073).

Поступила в редакцию / Received 04.09.2024