

УДК 553.411; 553.086
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4782
Шифр специальности ВАК: 1.6.4
Научная статья

Формы нахождения золота и минералов-спутников в скарнах (Горная Шория)

А.В. Чумаков^{1,2}✉, Е.Г. Панова¹, О.В. Аликин², В.Н. Рудашевский², Б.М. Осовецкий³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, г. Санкт-Петербург

² ООО «ЦНТ Инструментс», Россия, г. Санкт-Петербург

³ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, г. Пермь

✉ tchumakov.a.v@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью углубленного понимания процессов формирования и распределения золота в скарновых золото-сульфидных рудах, что имеет ключевое значение для эффективного освоения и переработки рудных месторождений. Горная Шория, обладая значительным потенциалом по запасам золота, требует детального изучения своих минеральных ресурсов для разработки инновационных методов добычи. В контексте глобальной тенденции роста спроса на золото, особенно в условиях его ограниченных природных запасов, изучение форм нахождения золота и его минералов-спутников становится особенно важным. **Цель:** определение содержания золота и форм его нахождения в метасоматитах месторождения, и выявление минералов-спутников. **Объектом** исследования являются метасоматиты, отобранные из керновых проб разведочного бурения, а также крупнообъемная технологическая проба руды массой 500 кг. **Методы:** современные методы пробоподготовки: электроимпульсная дезинтеграция и гидросепарация, петрографические и минераграфические исследования, сканирующая электронная микроскопия. **Результаты.** Настоящая работа представляет результаты комплексного исследования золото-сульфидных руд скарнового объекта, расположенного в Горной Шории. В ходе исследований охарактеризованы главные рудные минеральные ассоциации, что позволило выявить различные формы нахождения золота и его минералов-спутников. В частности, выделены и описаны четыре минеральные ассоциации: арсенопирит-леллингитовая, пирит-пирротиновая, полиметаллическая и теллуридно-сульфосольная. Полученные данные позволили выявить морфологические особенности самородного золота, его ассоциации с сульфидами и характер распределения в рудных минералах. Особое внимание уделено применению технологии гидросепарации (НС-технология) для эффективного выделения золота и обогащения рудных концентратов. Результаты работы могут быть использованы для оптимизации процессов переработки золотосодержащих руд и повышения эффективности извлечения благородного металла.

Ключевые слова: самородное золото, гидросепарация, золото-сульфидные руды, минералы-спутники, известковые скарны, Горная Шория, минералогия, электроимпульсная дезинтеграция, золоторудные месторождения, технологии обогащения

Благодарности: Авторы выражают благодарность Антону Владимировичу Антонову за помощь, оказанную в процессе электронно-микроскопических исследований и при проведении микрорентгеноспектральных анализов. За помощь в исследованиях, замечания и поддержку авторы благодарны Полине Никодимовне Лейбгам, Алексею Юрьевичу Пузику, Елене Михайловне Томилиной и Серафиме Александровне Удинцовой. Аналитические исследования выполнены в Ресурсном центре микроскопии и микроанализа (РЦ ММ) СПбГУ и в Центре коллективного пользования уникальным научным оборудованием ПГНИУ).

Для цитирования: Формы нахождения золота и минералов-спутников в скарнах (Горная Шория) / А.В. Чумаков, Е.Г. Панова, О.В. Аликин, В.Н. Рудашевский, Б.М. Осовецкий // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 8. – С. 60–73. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4782

UDC 553.411; 553.086
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4782
Scientific paper

Forms of gold and associated minerals in skarns (Gornaya Shoria)

A.V. Chumakov^{1,2}✉, E.G. Panova¹, O.V. Alikin², V.N. Rudashevsky², B.M. Osovetskiy³

¹ St Petersburg State University, St Petersburg, Russian Federation

² CNT Instruments LLC, St Petersburg, Russian Federation

³ Perm State University, Perm, Russian Federation

✉ tchumakov.a.v@yandex.ru

Abstract. Relevance. The need for an in-depth understanding of gold formation and distribution in skarn gold-sulfide ores, which is of key importance for the effective development and processing of ore deposits. Gornaya Shoria, having significant potential for gold reserves, requires a detailed study of its mineral resources for the development of innovative mining methods. In the context of the global trend of increasing demand for gold, especially in the context of its limited natural reserves, the study of the forms of gold and its associated minerals becomes particularly important. **Aim.** To determine gold content in metasomatites of the deposit, its forms of occurrence and identification of associated minerals. **Object.** Metasomatites taken from core samples of exploration drilling, as well as a large-volume process sample of ore weighing 500 kg. **Methods.** Modern methods of sample preparation: electric pulse disaggregation and hydroseparation, petrographic and mineralogical studies, scanning electron microscopy. **Results.** The research presents the results of a comprehensive study of gold-sulfide ores of a skarn site located in Gornaya Shoria. The authors have characterized the main ore mineral associations, which made it possible to identify various forms of gold and its associated minerals. In particular, four mineral associations: arsenopyrite-löllingite, pyrite-pyrrhotite, polymetallic and telluride-sulfosalt, were identified and described. The obtained data allowed revealing morphological features of native gold, its associations with sulfides and the character of distribution in ore minerals. Special attention is paid to the application of hydroseparation technology (HS-technology) for effective gold extraction and enrichment of ore concentrates. The results of the work can be used to optimize the processing of gold-bearing ores and increase the efficiency of extraction of the noble metal.

Keywords: native gold, hydroseparation, gold-sulfide ores, associated minerals, calcareous skarns, Gornaya Shoria, mineralogy, electric pulse disaggregation, gold deposits, enrichment technology

Acknowledgements: The authors express gratitude to Anton V. Antonov for his assistance in conducting electron microscopy studies and micro-X-ray spectral analyses. The authors are grateful to Polina N. Leibham, Aleksey Yu. Puzik, Elena M. Tomilina, Serafima A. Udina for their assistance in the research, comments, and support. Analytical studies were performed at the Centre for Microscopy and Microanalysis (CMM) of St. Petersburg State University and in the Center for Collective Use of Perm State University.

For citation: Chumakov A.V., Panova E.G., Alikin O.V., Rudashevsky V.N., Osovetskiy B.M. Forms of gold and associated minerals in skarns (Gornaya Shoria). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 8, pp. 60–73. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/4782

Введение

Золото относится к стратегическим полезным ископаемым, добыча которых необходима для пополнения запасов минерально-сырьевой базы (МСБ) страны. В настоящее время Российская Федерация обладает обширными запасами золота, обеспеченность действующих добывающих предприятий балансовыми запасами собственно золоторудных месторождений составляет около 18 лет, комплексных – менее 33 лет, а россыпных – 6 лет [1].

Для эффективного освоения этих запасов применяются различные методы обогащения и извлечения: гравитационное и флотационное обогащение минералов золота, амальгамирование,

рование золотосодержащих руд и концентратов, высокотемпературный хлорирующий обжиг с возгонкой золота в газовую фазу, автоклавное окисление золотосодержащих сульфидов, бактериальное выщелачивание и другие передовые методы [2–6]. Совершенствование технологий позволяет добиваться наивысшей степени извлечения металла и сокращения процессов обогащения. Максимальная степень извлечения в этом случае будет зависеть от точного определения форм нахождения золота.

Для дальнейшего развития горнодобывающей отрасли необходимо постоянно пополнять МСБ золота за счет традиционных месторождений, а также рассматривать нетрадиционные источники этого элемента.

Скарновые золотосодержащие месторождения представляют важный генетический тип месторождений и в настоящее время вызывают повышенный интерес горнодобывающих компаний [7–9]. В мировой добыче такие месторождения играют важную роль из-за высокого экономического потенциала и исследуются на протяжении длительного времени по всему миру [10–15]. Ряд регионов Российской Федерации имеют неопромышленные с необходимой детальностью объекты, одними из которых являются скарновые месторождения на Алтае, в которых содержания золота достигает 100 г/т [16–22]. К таким объектам относятся месторождения: золото-медно-скарновые (Синюхинское и Ульменское), медно-скарновые (Мурзинское), скарново-магнетитовые (Майское и Таштагольское).

При том, что на многих объектах установлены схемы и последовательность минералообразования, до сих пор не выявлены микро-минеральные формы нахождения золота. В ряде случаев это невозможно сделать без применения новых методик пробоподготовки и обогащения, а также современных методов исследования, позволяющих уточнить вещественный состав. Такой подход необходим для открытия в регионе новых геологических объектов и повышения изученности и перспективности уже известных месторождений, а также более полного извлечения золота.

Форма нахождения золота и его гранулометрическая характеристика являются одним из важнейших факторов, влияющих на переработку и обогащение [23–25]. Минералогия золота очень разнообразна: помимо самородной формы (Au–Ag-твердых растворов), золото образует природные соединения с разными элементами, среди которых установлены минералы Te, Pb, S, Cu, Sb, Bi, Se, Tl, Sn, Hg и Fe. Все эти элементы следует отнести к индикаторам-фиксаторам минералов золота в сульфидных рудах. При разработке технологий следует учитывать, в какой из собственных минеральных форм присутствует золото и какой размерности (макро-, микро-, нано-). При этом важно знать примесный состав самородного золота, наличие других собственных минералов золота, а также минералов, содержащих золото и серебро в качестве изоморфной примеси, и минералы-матрицы, содержащие микро- и нановключения минералов золота. Размеры частиц самородного золота в рудах варьируют от долей микрометра до десятков сантиметров. Различают четыре их группы: субмикроскопические, неразличимые с помощью оптических приборов, микроскопические и самородки. Предлагаемая классификация в основном повторяет предложенную Н.В. Петровской [26] с рядом изменений и дополнений [27], внесенных при изучении больших масс золота и составлении базы данных [28].

Поисково-ревизионными работами, проведенными сотрудниками Каштауской партии под руководством И.В. Демидова в 2008–2015 гг., дана оценка прогнозных ресурсов золота Сухаринского рудного поля и Каштауской рудоносной площади. Установлены минеральные ассоциации, с которыми связано золото. Золото ранней генерации (1-й) с пробностью 937 ‰ и связанное с лелленгитом, арсенопиритом и висмутином. Золото (2-й) с пробой 706–794 ‰ содержится в кристаллах арсенопирита в виде мелких включений с лелленгитом и самородным висмутом, с вторичными выделениями на их границах.

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

Материалы и методы исследования

Для характеристики скарнов использовались образцы метасоматитов, отобранные из керновых проб разведочного бурения. Шлифы и аншлифы исследовались на поляризационном микроскопе Leica DM4500P и на микроскопе Olympus BX51, камера Leica DC 300, программный пакет Autopano Giga. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) выполнена с использованием растрового электронного микроскопа-микроанализатора Hitachi TM 3000, сканирующего электронного микроскопа JSM-6390 с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350, сканирующего электронного микроскопа JSM-6390LV.

Содержания золота определялись методом пробирного анализа с ICP-AAS окончанием, сера общая и сульфидная определялись методом газового анализа в лаборатории ALS Group (г. Москва). Для анализа распределения микроэлементов использовали метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Для разложения образцов применяли царскую водку. Анализ растворов проведен на приборе Aurora M90.

Для выявления форм нахождения золота, его минералов-спутников и размерности их выделений отобрана технологическая проба массой 500 кг. Во избежание переизмельчения и получения артефактов дробление крупнообъемной пробы проводилось с использованием электроимпульсной дезинтеграции (установка EPD Spark-2), которая основана на технологии дробления материалов высоковольтными разрядами в воде [29–31]. Такая дезинтеграция обычно реализуется по границам фаз в минеральных агрегатах и обеспечивает минимальное переизмельчение исследуемого материала [32, 33].

Раздробленный материал разделялся на фракции методом мокрого ситования (мм): –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, что позволяет извлечь для исследования широкий размерный ряд минеральных и микроминеральных форм золота. Из фракции –0,045 мм материала класс крупности –0,010 мм отделялся методом ультразвуковой седиментации [34] в фарфоровых чашках с круглым днищем (Сапфир-2,8 ТТЦ, 2,8 л). Для определения содержаний золота и сопутствующих микроэлементов из исходной пробы и 8 классов крупности, которые подбирались для получения узких диапазонов размеров частиц и в соответствии с основными технологическими переделами для переработки золотосодержащих руд, отбирались аналитические навески для атомно-абсорбционной масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Крупная фракция (–1,0+0,5) изучена в однослойных полированных препаратах, а для исследования микроскопических выделений (–0,5+0,010) рудных минералов использована технология разделения по плотности твердых частиц с помощью гидравлического классификатора (гидросепаратор HS-11) и метода гидросепарации (HS-технология) [35–37]. Метод гидросепарации реализует разделение материалов с различной плотностью в пульсирующем водном потоке. Конкуренция масс частиц, захваченных восходящим слабым ламинарным потоком, приводит к осаждению тяжелых частиц на дне разделительной трубки и удалению легкой фракции. Обогащение измельченных материалов методом гидросепарации позволяет получить «тяжелый» концентрат (HS-концентрат), обеспечивающий статистически представительную информацию о «тяжелых» минералах для всего объема образца в интервале крупности частиц от –0,01 до 0,5 мм. Последние представляют репрезентативные выборки зёрен рудных минералов в пределах узких классов крупности, из которых изготовлены однослойные полированные шлифы для исследования с помощью методов электронно-микроскопических исследований.

Результаты и их обсуждение

На фоне основной зеленоватой массы метасоматитов, сложенной темно-зеленым агрегатом пироксенов, развивается светло-кремовый гранат в виде гнездообразных скоплений и тонких прожилков-просечек; сами скарны залегают согласно со слоистостью пород. При этом наблюдаются тонкие более поздние просечки карбонат-кварцевого и кварцевого составов.

Петрографические исследования и результаты рентгенофазового анализа показали, что известковые скарны, вмещающие золото-сульфидное оруденение, состоят из (отн. %): минералов группы пироксена (19,1), граната (18,7), полевых шпатов (17,3), хлорита (13,7), кальцита (7,9), актинолита (5,1), эпидота (5,0), пирита (4,6), кварца (4,3), магнетита (3,1), гетита (1,2), что позволяет назвать эти

породы известковыми скарнами с наложенной прожилковой и прожилково-вкрапленной сульфидной минерализацией.

Сульфидная минерализация характеризуется структурами отложения (гипидиоморфно- и аллотриоморфнозернистой), замещения (коррозионная) и давления (катакластическая). Текстуры имеют прожилковый неравномерно-вкрапленный и прожилково-вкрапленный характер и сложены сульфидной минеральной ассоциацией.

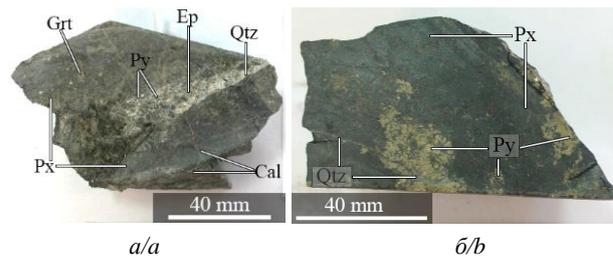


Рис. 1. Характерные образцы известковых скарнов с наложенной сульфидной минерализацией: а) связанной с кварцевым прожилком; б) гнездовидно-вкрапленная; Px – пироксен, Grt – гранат, Py – пирит, Ep – эпидот, Qtz – кварц, Cal – кальций

Fig. 1. Characteristic samples of calcareous skarns with superimposed sulfide mineralization: a) associated with quartz veining; b) nested disseminated; Px – pyroxene, Grt – garnet, Py – pyrite, Ep – epidote, Qtz – quartz, Cal – calcite

Известковые скарны характеризуются высокими содержаниями CaO (12,0–15,1 мас. %), Fe₂O₃ (16,3–27,6 мас. %) и MgO (2,3–3,3 мас. %) относительно гранодиоритов тельбесского комплекса – 3,1; 4,5 и 1,8 мас. %, соответственно. Содержание Na₂O наоборот минимальны в метасоматически измененных породах по сравнению с породами вмещающей рамы (1,3 и 3,8 мас. %, соответственно).

Определены содержания золота и его элементов-спутников по классам крупности в крупнообъемной технологической пробе (рис. 2, табл. 1). Среднее содержание золота составляет 2,0 г/т. Содержание сульфидной серы в породах варьируется в пределах 2,3–13,6 мас. %. Содержание микроэлементов изменяется в пределах (г/т): Ag – 0,9–2,4; As – 1707,2–4400,9; Zn – 608,6–1239,0; Cu – 440,3–869,2; Co – 61,7–187,2; Ni – 51,6–104,5; Pb – 31,8–72,4; Sb – 15,3–20,9; Bi – 14,9–26,8; Te – 0,7–0,9.

Наблюдается неравномерное распределение золота по классам крупности. Значительные содержания золота отмечены в классах (мм): –0,125+0,071 и –0,045+0,010 – 2,2 и 2,5 г/т, соответственно. Самые низкие содержания – в классе –0,010 мм: это обусловлено природным размерным распределением сульфидов, с которыми связано золото крупностью более, чем –0,010 мм.



Рис. 2. Распределение содержаний золота по классам крупности

Fig. 2. Grain size distribution of gold

Минералы-спутники золота в известковых скарнах

При изучении метасоматитов с наложенной сульфидной минерализацией нами выделены следующие рудообразующие сульфиды:

Арсенопирит ($FeAsS$) образует мономинеральные агрегаты, в которых зерна гипидиоморфны с незначительной зазубренностью (рис. 3, *a*). В ряде случаев арсенопирит развивается внутри массивных агрегатов геденбергита (рис. 3, *b*) и замещает шамозит. Средний химический состав арсенопирита (мас. %): Fe=37,04; As=43,30; S=19,18 (n=60). Частыми примесями в минерале являются кобальт и никель (первые доли мас. %).

Лёллингит ($FeAs_2$) встречается исключительно внутри зерен арсенопирита и образует кристаллы неправильной формы размером до 0,1 мм. В ряде случаев он является минералом-носителем дискретных включений самородного золота и самородного висмута (рис. 3, *c, d*). Средний химический состав лёллингита (мас. %): As=64,84; Fe=30,36; S=4,29 (n=45).

Самородный висмут (Bi) встречается как в виде отдельных зерен и сростков с арсенопиритом, так и в виде микровключений в арсенопирите и лёллингите, из природных металлов он наиболее распространенный (но не самый частый). Отмечены сростки самородного золота с самородным висмутом, что указывает на их совместный парагенезис.

Пирит (FeS_2) является преобладающим рудообразующим и «сквозным» минералом, наблюдаемым в сульфидных рудах. Выделяются несколько генераций пирита в рудах. Пирит-I характеризуется склонностью к идиоморфизму. Размер кристаллов в сульфидных рудах колеблется в широких пределах (0,1–2 мм). Пирит-II представлен в виде оторочек и корочек, которые развиваются по пирротину в процессе его замещения.

В химическом составе зерен пирита отмечены заметные примеси мышьяка, что указывает на его связь с образованием арсенопирита, в то время как для арсенопирита, который находится в сростках с пиритом, характерны примеси кобальта и сурьмы. Средний химический состав пирита (мас. %): Fe=47,12; S=52,74 (n=120).

Пирротин (FeS) является вторым главным сульфидным минералом после пирита. Минерал образует вкрапленность в геденбергите и других скарновых минералах. По данным минераграфического изучения взаимоотношений с другими рудными минералами выделены две генерации пирротина. Размер агрегатов варьирует от 0,5 до 2,0 мм и более (рис. 4), часто у пирротина наблюдаются корродированные грани кристаллов. Средний химический состав пирротина (мас. %): Fe=61,21; S=38,58 (n=91). Типичными элементами-примесями в пирротине являются кобальт и никель (доли % и первые %). Также при проведении микрозондовых исследований отмечен ряд химических анализов, в которых не встречаются элементы-примеси.

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

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

Класс крупности, мм Coverage class, mm	Исходная проба Reference sample	-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
Элемент Element									
Ag	1,2	2,4	1,0	0,9	0,9	1,0	1,1	1,4	1,2
As	2608,2	1707,2	2168,3	2523,2	3199,5	3701,6	3781,7	4400,9	2174,4
Zn	608,6	634,5	685,9	723,3	908,0	1059,9	1120,3	1239,8	893,7
Cu	573,4	440,3	457,5	458,0	488,5	516,0	591,3	869,2	742,1
Co	187,2	61,7	81,9	98,1	128,8	148,8	156,1	151,8	72,3
Ni	63,1	51,6	56,5	67,7	79,0	99,9	93,4	104,5	60,8
Pb	35,3	33,8	32,7	31,8	34,9	40,0	44,7	46,9	72,4
Sb	20,9	18,3	18,5	17,3	17,9	16,3	17,1	15,3	20,3
Bi	16,0	26,8	15,9	15,7	17,5	15,9	14,9	16,5	17,4
Te	0,8	0,9	0,7	0,8	0,9	0,8	0,9	0,9	0,8

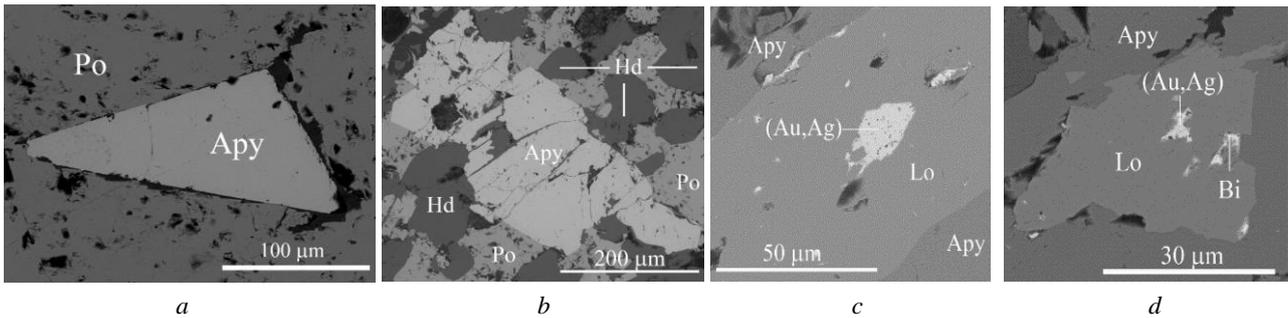


Рис. 3. Минералы мышьяка в исследуемых породах, BSE-изображение: а) идиоморфный кристалл арсенопирита в массивном агрегате пирротина; б) выделение арсенопирита в геденбергите; с, д) выделение лёллингита в арсенопирите, (Au,Ag) – самородное золото, Bi – самородный висмут, Lo – лёллингит, Apy – арсенопирит, Po – пирротин, Hd – геденбергит

Fig. 3. Arsenic minerals in the studied rocks, BSE-image: a) idiomorphic crystal of arsenopyrite in massive aggregate of pyrrhotite; b) isolation of arsenopyrite in hedenbergite; c, d) isolation of löllingite in arsenopyrite, (Au, Ag) – native gold, Bi – native bismuth, Lo – löllingite, Apy – arsenopyrite, Po – pyrrhotite, Hd – hedenbergite

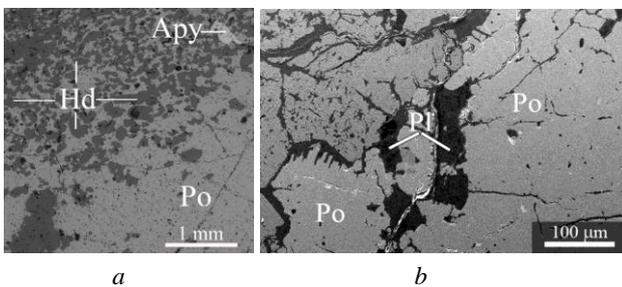


Рис. 4. Массивный пирротинный агрегат, BSE-изображение: а) фрагмент зоны сульфидизации (переход от массивной к вкрапленной текстуре в пироксенах); б) пирротин на контакте с плагиоклазами, Po – пирротин, Apy – арсенопирит, Pl – плагиоклаз, Hd – геденбергит

Fig. 4. Massive pyrrhotite aggregate, BSE-image: a) fragment of the sulfidation zone (transition from massive to disseminated texture in pyroxenes); b) pyrrhotite at the contact with plagioclases, Po – pyrrhotite, Apy – arsenopyrite, Pl – plagioclase, Hd – hedenbergite

Теллуровисмутин (Bi_2Te_3) пространственно связан только с пирротинином и представляет микровключения в нем (рис. 5). Встречается в виде частиц (3–10 μm) и представляет удлиненные, изредка субмикронные кристаллы и участки замещения пирротина. Средний состав минерала (мас. %): $Bi=51,26$; $Te=48,74$ ($n=40$).

В составе полиметаллической группы нами установлены минералы полиметаллической ассоциации: халькопирит, кобальтин, сфалерит, галенит, пространственно связанные с пирритом (рис. 6). Эти минералы часто образуют структуры замещения в пиррите, о чем свидетельствуют агрегаты сфалерита в нем, не имеющие четких кристаллографических граней.

Халькопирит ($CuFeS_2$) является мало распространенным минералом, часто наблюдается в ассо-

циации с пирритом. Нами выделены две генерации халькопирита, Халькопирит-I отмечен вместе с кварцем, заполняет трещины в гранате в виде аллотриоморфных кристаллов размерами более 0,1 мм. Халькопирит-II обладает правильными кристаллографическими очертаниями и образует сростки с пирритом в силикатной матрице (чаще всего это минерал группы хлорита – шамозит). Средний химический состав халькопирита (мас. %): $Fe=32,36$; $Cu=34,01$; $S=33,64$ ($n=35$).

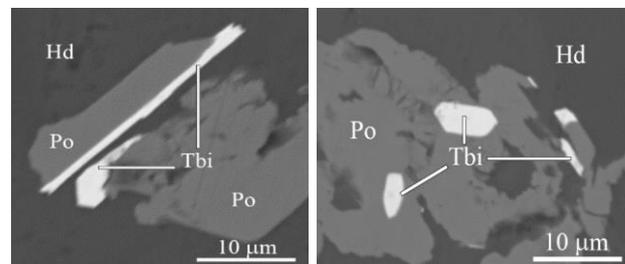


Рис. 5. Микровключения теллуровисмутина в пирротине, Hd – геденбергит, Tbi – теллуровисмутин, Po – пирротин, BSE-изображение

Fig. 5. Tellurobismuthine microinclusions in pyrrhotite, Hd – hedenbergite, Tbi – tellurobismuthine, Po – pyrrhotite, BSE-image

Сфалерит (ZnS) проявлен слабо – в отдельных шлифах его содержание не превышает 1–2 %. Развита главным образом внутри массивных агрегатов пиррита в виде зерен неправильной формы, размер образований 0,05–0,1 мм. Средний химический состав сфалерита (мас. %): $Zn=64,2$; $S=29,3$, повсеместно распространена примесь $Fe=5,5$ ($n=20$).

Галенит (PbS) в основном представлен в виде тончайших вкраплений в интерстициях массивного арсенопирита, размер которых редко превышает первые микрометры.

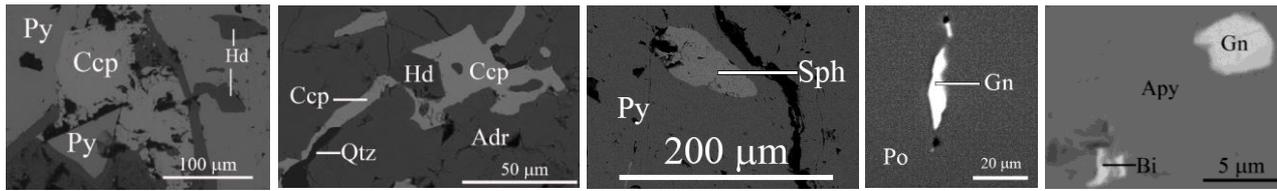


Рис. 6. Минералы полиметаллической стадии рудообразования, BSE-изображение: а) сросток с пиритом на контакте с геденбергитом; б) трещины в гранате, выполненные халькопиритом и кварцем; в) выделение сфалерита в массивных агрегатах пирита; д) микровключение галенита в пирротине; е) микровключения галенита в арсенопирите, – халькопирит, Py – пирит, Hd – геденбергит, Qtz – кварц, Adr – андрадит, Sph – сфалерит, Gn – галенит, Po – пирротин, Bi – самородный висмут

Fig. 6. Minerals of polymetallic stage of ore formation, BSE-image: a) intergrowth with pyrite at the contact with hedenbergite; b) cracks in garnet made by chalcopyrite and quartz; c) sphalerite isolation in massive aggregates of pyrite; d) galena microinclusions in pyrrhotite; e) galena microinclusions in arsenopyrite, – chalcopyrite, Py – pyrite, Hd – hedenbergite, Qtz – quartz, Adr – andradite, Sph – sphalerite, Gn – galena, Po – pyrrhotite, Bi – native bismuth

Часто галенит залечивает трещины в сульфидах, чаще всего в пирротине (рис. 6, d). Крайне редко встречаются гипидиоморфные кристаллы галенита в арсенопирите размерами до 0,01 мм (рис. 6, e). Средний химический состав галенита (мас. %): Pb=85,75; S=14,25 (n=30).

В составе теллуридно-сульфосольной минеральной ассоциации нами установлены теллуrowисмутин, раклиджит, ксилинголит, серебристое золото и др., которые пространственно дистанцируются от полиметаллического парагенезиса. Эти минералы в основном образуют скопления в пустотах агрегатов вышеописанных ассоциаций (пирит-пирротиновой, реже – арсенопирит-леллингитовой). Секущих взаимоотношений между минералами данной ассоциации не установлено.

Раклиджит $((Bi,Pb)_3Te_4)$ и ксилинголит $(Pb_3Bi_2S_6)$ образуют редкие сростки с серебристым золотом, что дает основание полагать, что золотая минерализация является низкотемпературной и связана с поздними стадиями рудообразования (рис. 6, d, e). Средний химический состав ксилинголита (мас. %): Pb=47,56; Bi=29,35; S=19,30; Fe=0,90; Sb=2,69 (n=25), раклиджита (мас. %): Te=44,90; Bi=41,44; Pb=12,79; Ag=1,23; Fe=0,64 (n=21).

Сульфидная минерализация в скарнах характеризуется многофазным процессом формирования. Основными сульфидными минералами являются: пирит, пирротин, арсенопирит и леллингит. Арсенопирит образует мономинеральные агрегаты и замещает шамотит, в то время как леллингит встречается внутри его зерен, указывая на их парагенетическую связь. Пирит, как преобладающий рудообразующий минерал, замещает пирротин, что свидетельствует о динамическом развитии минералогических процессов. Пирротин образует агрегаты различного размера с корродированными гранями, а теллуrowисмутин пространственно связан с ним, отражая низкотемпературный этап рудообразования. Полиметаллическая ассоциация, представленная халькопиритом, сфале-

ритом и галенитом, часто формирует замещающие структуры в пирите, что подчеркивает сложность и последовательность метасоматических изменений.

Морфология золота в метасоматитах

Морфологические характеристики частиц золота являются ключевыми для понимания их распределения и нахождения в пределах изучаемого объекта. В метасоматитах золото отмечено в различных формах, включая свободные частицы и золото, связанное с сульфидами. На рис. 7 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 [26, 28]. Внутри морфологических типов выделяются виды, к которым отнесено отмеченное золото: трещинные золотины (правильный тип), интерстициальные частицы (неправильный тип), гемиидиоморфные выделения (смешанный тип).

Трещинные прожилковые золотины – удлиненные, вытянутые частицы золота с извилистыми контурами, образованные в результате заполнения золотом трещин в кварце и вмещающих породах. Представлены удлиненными золотинами сложных форм (рис. 7, d, e).

Интерстициальные частицы – угловатые и уплощенные частицы, утолщенные в центре, с короткими островыклинивающимися выступами вдоль границ зерен вмещающих минералов (рис. 7, c).

Гемиидиоморфные выделения – в данном случае представляют собой золотины интерстициального облика с отдельными несовершенно развитыми ограниченными выступами и ответвлениями (рис. 7, a, b).

В виде включений в сульфидах и других минералах чаще всего наблюдаются комковидные золотины, представляющие собой частицы золота сложной формы, напоминающие комки пластичного вещества.

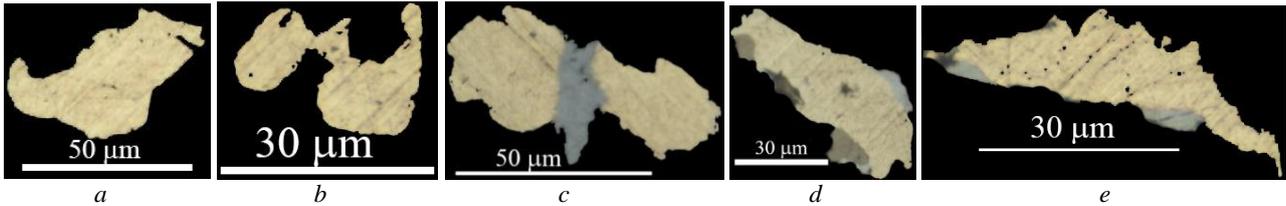


Рис. 7. Зёрна самородного золота в «тяжелом» HS-концентрате (фр. $-0,045+0,010$ мм); полированный шлиф, оптические фото, а–с) частицы золота гемидиоморфного облика, d, e) вытянутые золотины трещинно-прожилкового облика

Fig. 7. Native gold grains in “heavy” HS-concentrate (fractions of $-0,045+0,010$ mm); polished slip, optical photos, a–c) gold particles of hemidiomorphic appearance, d, e) elongated gold grains of fracture-vein appearance

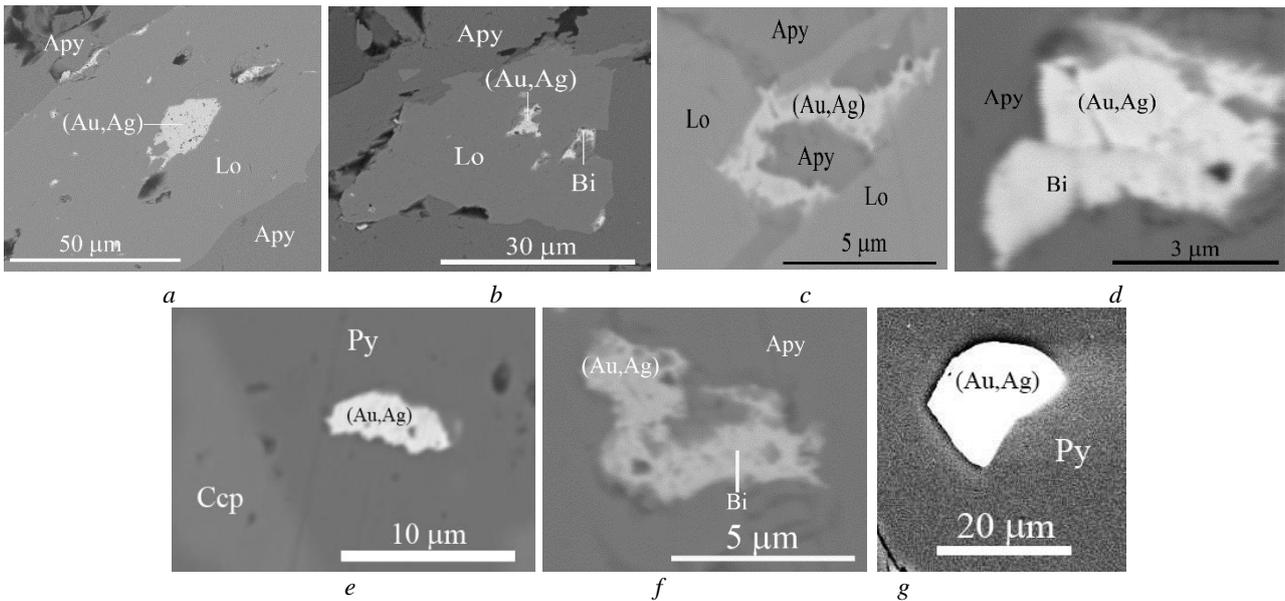


Рис. 8. Включения самородного золота в сульфидах, сульфосоляридах и арсенидах железа, BSE-изображение, Au, Ag – самородное золото, Lo – леллингит, Apy – арсенопирит, Csp – халькопирит, Py – пирит, Bi – самородный висмут, а–d) комковидные золотины, вроски в других минералах; e, f) включения в пирите частиц золота таблитчатой формы, близких к изометричным; g) включение комковидной золотины в арсенопирите

Fig. 8. Native gold inclusions in sulfides, sulfoarsenides and iron arsenides, BSE-image, Au, Ag – native gold, Lo – löllingite, Apy – arsenopyrite, Csp – chalcopyrite, Py – pyrite, Bi – native bismuth, a–d) lump-shaped gold particles, ingrowths in other minerals; e, f) inclusions in pyrite of gold particles of tabular shape, close to isometric; g) inclusion of lump-shaped gold particles in arsenopyrite

Характеризуются более плотной центральной частью, от которой в разные стороны отходят быстро выклинивающиеся ответвления или угловатые выступы (рис. 8, а–с, f, g). Такие выделения цементируют раздробленные минералы либо заполняют собой участки локального растрескивания в них и являются достаточно характерными для рудного золота. Также наблюдаются плохо образованные таблитчатые изометричные или близкие к изометричным зерна с округленными вершинами и ребрами (рис. 8, d, e).

Таким образом, самородное золото в изученных скарнах с наложенной сульфидной минерализацией имеет разнообразную морфологию: встречаются таблитчатые, трещинные, комковидные, интерстициальные и гемидиоморфные формы, а среди золо-

та, 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 систематикой Н.В. Петровской [26] с дополнениями Николаевой Л.А. и соавторов [28] выполнен статистический анализ размеров частиц в микронах (рис. 9) (для классификации использовался параметр ECD – equivalent circle diameter). Стоит отметить, что размеры самородного золота варьируют в большом диапазоне: от первых мкм до 200 мкм.

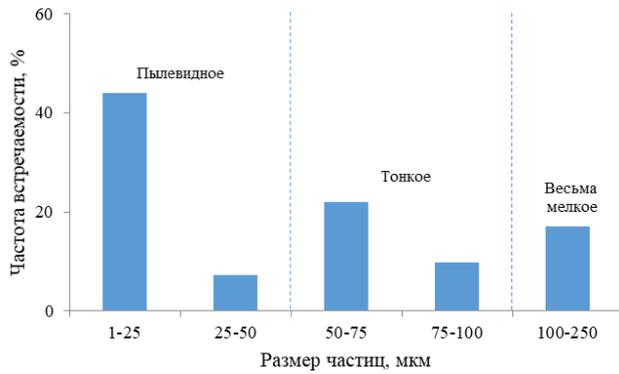


Рис. 9. Оценка встречаемости золота в исследуемых метасоматитах по размеру частиц

Fig. 9. Estimation of gold occurrence in the metasomatites of the deposit of grain size distribution of native gold

Анализ размеров частиц самородного золота (рис. 9) указывает на значительную его долю (51,2 %) в диапазоне размеров частиц 1–50 мкм, что по предложенной классификации относится к пылевидному золоту. Эффективное извлечение частиц такой крупности может потребовать флотации или цианирования. Кроме того, порядка 31,7 % 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. К весьма мелкому золоту относится 17,1 %.

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

Химический состав золота

При исследовании аншлифов и HS-концентратов нами выделено две генерации золота в сульфидизированных скарнах. Золото-I отмечено в виде субмикроскопических и тонкодисперсных выделений (первые мкм) в леллингите, арсенопирите

и пирите (рис. 8). Золото во включениях представлено в форме серебристого золота и различается по содержанию примеси серебра в нем. Средний химический состав таких частиц (мас. %): Au=74,83±3,13; Ag=25,17±3,09 (n=40).

Золото-II (серебристое золото) отмечено исключительно в HS-концентратах и преобладает в виде удлинённых или таблитчатых зерен (рис. 10), которые представляют собой тонкие и пылевидные частицы (размером 30–50 мкм). Химический состав Золота-II (серебристого золота) разнообразен, содержание Au и Ag варьирует в диапазоне (мас. %): Au: 81,11±1,92 и Ag: 18,89 ±4,06 (n=45).

Основным отличием золота в сульфидах от свободных частиц является сильная вариативность химического состава, а также более высокие содержания серебра, чем в свободных частицах.

Все указанные минералы благородных металлов в изученной пробе хорошо вскрыты в результате применения электроимпульсной дезинтеграции. Вклад свободного серебристого золота в благороднометалльную минерализацию составляет 80,02 % от всего количества золота, представленного в изучаемых метасоматитах, 19,98 % – золото в виде тонких включений в сульфидах и сульфосарсенидах.

В пределах исследуемого объекта уточнена «продуктивная» сульфидная минерализация. Полученные данные согласуются с результатами работ по схожим объектам Горной Шории (Сухаринский рудный узел), в пределах которых отмечаются схожие ряды окolorудных изменений и минеральных ассоциаций, с которыми связано золото. Для исследуемого объекта характерно образование известковых скарнов с наложенной на них сульфидной минерализацией (пирит-пирротинная с незначительным количеством арсенопирита, халькопирита и сфалерита).

На основании данных о содержании благородных металлов и микроэлементов, количественной оценки зерен в аншлифах и HS-концентратах, а также состава самих минералов оценен минеральный баланс рудообразующих минералов (табл. 2).

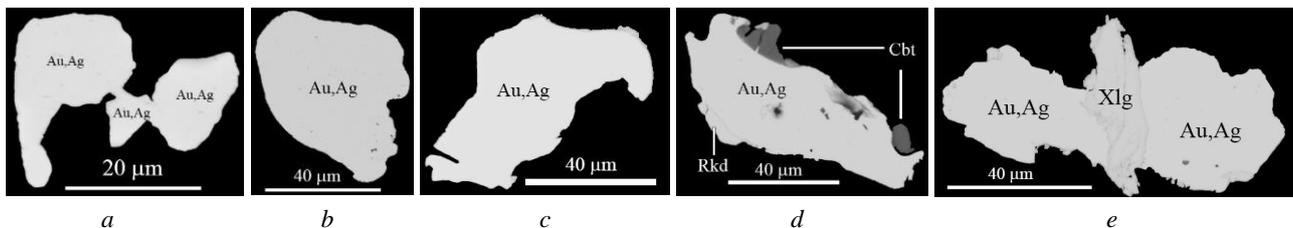


Рис. 9. Зёрна самородного золота в руде из «тяжелых» концентратов гидросепарации, BSE-изображение: a–c) свободные зерна; d, e) в сростках с сульфидами и висмутотеллуридами, Au, Ag – самородное золото, Cbt – кубанит: $CuFe_2S_3$, Rkd – раклджит: $(Bi,Pb)_3Te_4$, Xlg – ксилинголит: $Pb_3Bi_2S_6$

Fig. 9. Native gold grains in primary ore from "heavy" hydroseparation concentrates, BSE-photo: a–c) free grains; d, e) in aggregates with sulfides and bismutotellurides, Au, Ag – native gold, Cbt – cubanite: $CuFe_2S_3$, Rkd – ruckledgite: $(Bi,Pb)_3Te_4$, Xlg – xilingolite: $Pb_3Bi_2S_6$

Таблица 2. Содержания рудных минералов в сульфидизированных скарнах (мас. %)

Table 2. Ore mineral contents in sulfidized skarns (wt %)

Минерал/Mineral	Формула Formula	Содержание, мас. % Content, wt %	Доля, % Proportion, %
Главные/Main			
Пирит/Pyrite	FeS ₂	4,61	50,60
Пирротин/Pyrrhotite	Fe _{1-x} S	3,87	42,48
Арсенопирит/Arsenopyrite	FeAsS	0,35	3,84
Халькопирит/Chalcopyrite	CuFeS ₂	0,13	1,43
Сфалерит/Sphalerite	ZnS	0,08	0,88
Кобальтин/Cobaltite	CoAsS	0,04	0,44
Лёллингит/Löllingite	FeAs ₂	0,02	0,22
Галенит/Galena	PbS	0,01	0,11
Редкие/Rare			
Самородный висмут/Native bismuth	Bi	Ед. знаки/Ind. finds	
Теллуrowисмутит/Tellurobismuthite	Bi ₂ Te ₃		
Висмутит/Bismutite	Bi ₂ S ₃		
Ксилинголит/Xilingolite	(Bi,Pb) ₃ Te ₄		
Раклиджит/Rucklidgeite	Pb ₃ Bi ₂ S ₆		
Сумма/Summary		9,11	100,00

По минеральному составу в первичных рудах преобладает пирит-пирротиновая минеральная ассоциация (~8 мас. %), в подчиненных количествах встречаются арсенопирит (0,35 мас. %) и халькопирит (0,13 мас. %). Суммарное содержание сульфидов в руде – 9,11 мас. % (табл. 2).

По содержанию сульфидов руды месторождений золота делят на мало-сульфидные (до 1–5 мас. %), умеренно-сульфидные (5–20 мас. %) и высоко-сульфидные (более 20 мас. %) [26, 38, 39]. Исследуемый объект по предложенной классификации следует отнести к умеренно-сульфидному типу золоторудных объектов. Информация о количественном соотношении сульфидов в исследуемых породах имеет существенное влияние на выбор технологии извлечения золота при обогащении [40–42]: в случае умеренно-сульфидных руд наиболее целесообразно использовать флотационную схему обогащения или технологию кучного выщелачивания.

Выводы

- Известковые скарны состоят из (отн. %): минералов группы пироксена (19,1), граната (18,7), полевых шпатов (17,3), хлорита (13,7), кальцита (7,9), актинолита (5,1), эпидота (5,0), пирита (4,6), кварца (4,3), магнетита (3,1), гетита (1,2), что позволяет их описать как известковые скарны. В метасоматитах присутствует значительное количество сульфидов (~9 мас. %), которые представлены главным образом пиритом и пирротином с небольшим количеством арсенопирита, халькопирита, сфалерита и галенита.
- Наиболее высокие содержания золота отмечены в классах крупности (мм): 0,125+0,071=2,2 г/т и 0,045+0,10=2,5 г/т. В виде элементов-примесей обнаружены (г/т): Ag – 0,5–2,4; As – 390,0–4400,9; Bi – 14,9–26,8; Te – 0,70–0,91, Co – 23–187; Ni –

38–112; Cu – 274–1553; Pb – 26,3–131,0; Zn – 243,0–2933,0; Sb – 14,2–310,0.

- Метод гидросепарации на приборе CNT HS-11, который позволил выделить тончайшие частицы самородного золота, в отличие от использования традиционных методик с применением тяжелосреднего обогащения. Золото присутствует в самородной форме и в виде включений в сульфидах. 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 в пирите в виде мелких округлых каплевидных обособлений. По размерным характеристикам порядка 51 % всего золота в метасоматитах относятся к пылевидному классу (–50+1 мкм).
- В сульфидизированных скарнах обнаружено две генерации золота. Золото-I отмечено в виде субмикроскопических и тонкодисперсных выделений (первые мкм) в сульфидах. Средний химический состав Золота-I (мас. %): Au=74,83±3,13; Ag=25,17±3,09 (n=40). Золото-II преобладает в форме удлиненных и таблитчатых агрегатов сложного облика (размером 30–50 мкм). Средний химический состав Золота-II (мас. %): Au: 81,11±1,92 и Ag: 18,89±4,06 (n=45).
- Обнаружены следующие минералы-спутники золота: пирит, пирротин, арсенопирит, халькопирит, лёллингит, сфалерит, кобальтин, галенит, самородный висмут, теллуrowисмутит, висмутит, ксилинголит и раклиджит. Суммарное содержание минералов-спутников золота на исследуемом объекте – 9,11 мас. %. Сделан расчет минерального баланса главных сульфидных ми-

нералов в метасоматитах и минералов золота. Среди главных рудных минералов преобладает пирит (50,60 %) и пирротин (42,48 %), в незначительных количествах отмечены арсенопирит (3,84 %), халькопирит (1,43 %), сфалерит (0,88 %) и кобальтин (0,44 %).

6. Полученная информация о количественном соотношении сульфидов в исследуемых породах имеет существенное влияние на выбор технологии извлечения золота при обогащении: в случае умеренно-сульфидных руд наиболее целесообразно использовать флотационную схему обогащения или технологию кучного выщелачивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевой базы Российской Федерации в 2021 году / под ред. Д.Д. Тетенькина, Е.И. Петрова. – М., 2022. – 626 с.
2. Биогидрометаллургическая переработка сульфидных руд / С.С. Гудков, И.И. Рязанова, Л.Е. Шкетова, Ю.Е. Емельянов // Цветные металлы. – 2004. – № 8. – С. 47–48.
3. 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.
4. Кучерский Н.И. Современные технологии при освоении коренных месторождений золота. – М.: Руда и металлы, 2007. – 696 с.
5. Travis J.M., Daniel W.K. Precious metal heap leach design and practice // SME Mining Engineering Handbook. 3rd ed. – Englewood: SME, 2011. – Vol. 1. – 1840 p.
6. Ernawati R., Idrus A., Petrus H. 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. – 2018. – Vol. 212 (1). – 012019. DOI: 10.1088/1755-1315/212/1/012019.
7. The formation and preservation of the Witwatersrand goldfields, the world's largest Gold province / H.E. Frimmel, D.I. Groves, J. Kirk, J. Ruiz, J. Chesley, W.E.L. Minter // Economic Geology 100th Anniversary Volume. – 2005. – P. 769–797. DOI: 10.5382/AV100.23
8. Wu Ya., Kainan M. Advances in skarn type gold // Deposits International Journal of Earth Sciences and Engineering. – 2016. – Vol. 9. – № 5. – P. 1916–1921.
9. Крупное Быстринское Cu-Au-Fe (Восточное Забайкалье) – первый в России пример ассоциированной с адakitami скарново-порфировой рудообразующей системы / В.А. Коваленкер, С.С. Абрамов, Г.Д. Киселева, Т.Л. Крылова, Ю.И. Языкова, Н.С. Бортников // Доклады Академии Наук. – 2016. – Т. 468. – № 5. – С. 547–552. DOI: 10.7868/S0869565216170205
10. Burt M.B. Skarn deposits-historical bibliography through 1970 // Economic Geology. – 1982. – Vol. 7. – № 4. – P. 755–763. DOI: 10.2113/gsecongeo.77.4.755
11. Meinert L.D., Dipple G.M., Nicolescu S. World skarn deposits // Economic Geology 100th Anniversary Volume. – 2005. – Vol. 1905–2005. – P. 299–336. DOI: 10.5382/AV100.11
12. Meinert L.D. Gold in skarns related to epizonal intrusions: SEG Reviews. – 2000. – Vol. 13. – P. 347–375.
13. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: an overview / Y.-J. Chen, H.-Y. Chen, K. Zaw, F. Pirajno, Z.-J. Zhang // Ore Geology Reviews. – 2007. – Vol. 31. – № 1–4. – P. 139–169. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2005.01.001
14. Analyzing the characteristics and available attributes of skarn gold deposit tailings, springer geochemistry / Y. Cheng, F. Huang, G. Li, Q. Yang, H. Peng, R. Liu // Mineralogy – Proceedings of the 11th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM). – 2015. – 559 p. DOI: 10.1007/978-3-319-13948-7_6
15. The role of porphyry-related skarns in the Chating porphyry copper and gold deposit, eastern China / Q. Xiao, T. Zhou, P. Hollings, S. Wang, J. Liu, N. White, B. Fu, F. Yuan // Ore Geology Reviews. – 2021. – Vol. 133. – P. 1–13. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104096.
16. Алабин Л.В., Калинин Ю.А. Металлогения золота Кузнецкого Алатау. – Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1999. – 236 с.
17. Вахрушев В.А. Минералогия, геохимия и образование месторождений скарново-золоторудной формации. – Новосибирск: Наука, 1972. – 241 с.
18. Гаськов И.В. Эндеогенное золото российского Алтая // Руды и металлы. – 2023. – № 3. – С. 37–60. DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10012.
19. Гусев А.И. Эпитермальное оруденение благородных металлов Горного Алтая и Горной Шории // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – № 3. – Т. 308. – С. 32–35.
20. Гусев А.И. Золото-медно-скарновое оруденение Ульменского месторождения Горного Алтая // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 5. – С. 111–115.
21. Логвиненко О.В., Тимкин Т.В. Вещественный состав и последовательность минералообразования рудопоявления Лог-26 Топольнинского золоторудного поля (Горный Алтай) // Вестник Томского государственного университета. – 2014. – № 383. – С. 212–220.
22. Окулов А.В., Шатилова Л.В., Рожченко В.А. Минералого-геохимическая характеристика золоторудных проявлений Топольнинского рудного поля // Руды и металлы. – 2016. – № 1. – С. 52–62.
23. Волков В.А., Генкин А.Д., Гончаров В.И. О формах нахождения золота в рудах месторождений Наталкинское и Майское // Тихоокеанская геология. – 2006. – Т. 25. – № 6. – С. 18–29.
24. Архипов Г.И. Минеральные ресурсы горнорудной промышленности Дальнего Востока. Обзор состояния и возможности развития. – М.: Горная книга. 2011. – 830 с.

25. Пальянова Г.А. Минералы золота и серебра в сульфидных рудах // Геология рудных месторождений. – 2020. – Т. 62. – № 5. – С. 426–449. DOI: 10.31857/S0016777020050056
26. Петровская Н.В. Самородное золото (общая характеристика, типоморфизм, вопросы генезиса). – М.: Наука, 1973. – 349 с.
27. Юшкин Н.П. Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества. – СПб.: Наука. 2005. – 581 с.
28. Изучение самородного золота при геологоразведочных работах, Методические рекомендации. изд. второе, перераб. и доп. / Л.А. Николаева, А.М. Гаврилов, А.Н. Некрасова, С.В. Яблокова, Л.В. Шатилова, Н.Н. Позднякова / отв. ред. А.И. Черных. – М.: ЦНИГРИ, 2023. – 74 с.
29. Зорин А.С. Электроимпульсная технология дробления твёрдых 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.
30. Курец В.И., Усов А.Ф., Цукерман В.А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. – Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2002. – 324 с.
31. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – СПб: Машиностроение, 1986. – 252 с.
32. Технологическая минералогия золота / В.Н. Рудашевский, Н.С. Рудашевский, А.В. Антонов, Ф.М. Набиуллин, Д.М. Пастухов // Записки РМО. – 2017. – Т. 146. – № 1. – С. 103–125.
33. 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.
34. Личманова А.И. Применение ультразвука в подготовке почв к механическому анализу // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 1972. – Вып. 4. – С. 42–47.
35. Гидравлический классификатор: пат. № 2281808, Российская Федерация, С1; заявл. 08.12.2004; опубл. 20.08.2006, Бюл. № 23. – 7 с.
36. Gold characterization of a sample from Malartic East (Québec) using concentration by hydroseparator / R. Lastra, J. Price, L.J. Cabri, V.N. Rudashevsky, G. McMahon // Proc. International Symposium on the Treatment of Gold Ores, Calgary, Alberta // Eds. G. Deschênes, D. Houdin, L. Lorenzen. – 2005. – Vol. 44. – P. 17–29.
37. Rudashevsky N.S., Nielsen T.F.D., Rudashevsky V.N. The PGE-Au mineralisation of the Skaergaard intrusion: precious metal minerals, petrography and ore genesis // GEUS Bulletin. – 2023. – Vol. 54. DOI: 10.34194/geusb.v54.8306
38. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. – Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 1999. – 775 с.
39. Секисов Г.В., Соболев А.А., Нигаи Е.В. Типы маломасштабных золоторудных месторождений Дальневосточного региона и основные направления их рационального освоения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 2. – С. 192–201.
40. Beneficiation of the gold bearing ore by gravity and flotation / A. Gül, O. Kangal, A.A. Sirkeci, G. Önal // International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. – 2012. – Vol. 19. – № 2. – P. 106–110. DOI: 10.1007/s12613-012-0523-4
41. Studying the flotation of gold-bearing ores using carrier minerals / S.I., Evdokimov N.S. Golikov, D.A. Zadkov, E.V. Voitovich, V.V. Kondratiev, A.A. Petrovskiy, V.Y. Konyukhov, V.A. Gladkikh // Minerals. – 2024. – Vol. 14. – № 1:88. DOI: 10.3390/min14010088
42. Processing technologies for gold-telluride ores / J. Zhang, Y. Zhang, W. Richmond, H-P. Wang // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2010. – Vol. 17. – № 1. – P. 1–10. DOI: 10.1007/s12613-010-0101-6

Информация об авторах

Александр Васильевич Чумаков, аспирант кафедры геохимии Института наук о земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9, tchumakov.a.v@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0000-4311-9130>

Елена Геннадьевна Панова, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геохимии Института наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9. e.panova@spbu.ru

Олег Владимирович Аликин, заведующий лабораторией технологической минералогии ООО «ЦНТ Инструментс», Россия, 195275, г. Санкт-Петербург, шоссе Революции, 69, лит. И; o.v.alikin@yandex.ru

Владимир Николаевич Рудашевский, кандидат геолого-минералогических наук, генеральный директор ООО «ЦНТ Инструментс», Россия, 195275, г. Санкт-Петербург, шоссе Революции, 69, лит. И. vlad.rudashevsky@gmail.com

Борис Михайлович Осовецкий, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры минералогии и петрографии Геологического факультета, Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15. opal@mail.ru

Поступила в редакцию: 22.07.2024

Поступила после рецензирования: 10.09.2024

Принята к публикации: 13.05.2025

REFERENCES

1. *State report on the state and use of the mineral resource base of the Russian Federation in 2021*. Ed. by D.D. Tetenkin, E.I. Petrov. Moscow, 2022. 626 p.
2. Gudkov S.S., Ryazanova I.I., Shketova L.E., Emelyanov E.E. Biohydrometallurgical processing of sulfide ores. *Non-Ferrous Metals*, 2004, no. 8, pp. 47–48. (In Russ.)
3. Gudkov A.S., Mineyev G.G., Zhuchkov I.A. Evaluation of autoclave oxidation of sulfide concentrates in relation to the subsequent sulfite-thiosulfate leaching of noble metals, *Bulletin of IrSTU*, 2010, no. 3, pp. 84–90. (In Russ.)

4. Kucherskiy N.I. *Modern technologies in the development of primary gold deposits*. Moscow, Ore and Metals Publ., 2007. 696 p. (In Russ.)
5. Travis J.M., Daniel W.K. Precious metal heap leach design and practice. *SME Mining Engineering Handbook*. 3rd ed. Englewood, SME, 2011. Vol. 1. 1840 p.
6. Ernawati R., Idrus A., Petrus H. 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 (1) 012019. DOI: 10.1088/1755-1315/212/1/012019.
7. Frimmel H.E., Groves D.I., Kirk J., Ruiz J., Chesley J., Minter W.E.L. The formation and preservation of the Witwatersrand goldfields, the world's largest gold province. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 2005, pp. 769–797.
8. Wu Ya., Kainan M. Advances in skarn type gold. *Deposits International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 2016, vol. 9, no. 5, pp. 1916–1921.
9. Kovalenker V.A., Abramov S.S., Kiseleva G.D., Krylova T.L., Yazykova Y.I., Bortnikov N.S. Large Bystrinskoye Cu-Au-Fe (Eastern Transbaikalia) – Russia's first example of associated with adakites skarn porphyry ore-forming system. *Reports of the Academy of Sciences*, 2016, vol. 468, no. 5, pp. 547–552. (In Russ.) DOI: 10.7868/S0869565216170205
10. Burt D.M. Skarn deposits-historical bibliography through 1970. *Economic Geology*, 1982, vol. 7, no. 4, pp. 755–763. DOI:10.2113/gsecongeo.77.4.755
11. Meinert L.D., Dipple G.M., Nicolescu S. World skarn deposits. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 2005, vol. 1905–2005, pp. 299–336. DOI: 10.5382/AV100.11
12. Meinert L.D. Gold in skarns related to epizonal intrusions. *SEG Reviews*, 2000, vol. 13, pp. 347–375.
13. Chen Y.-J., Chen H.-Y., Zaw K., Pirajno F., Zhang Z.-J. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: an overview. *Ore Geology Reviews*, 2007, vol. 31, no. 1–4, pp. 139–169. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2005.01.001.
14. Cheng Y., Huang F., Li G., Yang Q., Peng H., Liu R. Analyzing the characteristics and available attributes of skarn gold deposit tailings. *Springer Geochemistry/Mineralogy – Proceedings of the 11th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM)*, 2015, 559 p. DOI: 10.1007/978-3-319-13948-7_6
15. Xiao Q., Zhou T., Hollings P., Wang S., Liu J., White N., Fu B., Yuan F. The role of porphyry-related skarns in the Chating porphyry copper and gold deposit, eastern China. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 133, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104096.
16. Alabin L.V., Kalinin Yu.A. *Metallogeny of gold of the Kuznetsk Alatau*. Novosibirsk, SB RAS NIC OIGGM Publ., 1999. 236 p. (In Russ.)
17. Vahrushev V.A. *Mineralogy, geochemistry and deposit formations of the skarn- gold formations*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1972. 241 p. (In Russ.)
18. Gaskov I.V. Endogenous gold of the Russian Altai. *Ores and metals*, 2023, no. 3, pp. 37–60. (In Russ.) DOI: 10.47765/0869-5997-2023-10012.
19. Gusev A.I. Epithermal mineralization of precious metals in the Altai Mountains and Gornaya Shoria. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2005, vol. 308, no. 3, pp. 32–35. (In Russ.)
20. Gusev A.I. Gold-copper-skarn mineralization of the Ulmenskoye deposit of the Altai Mountains. *Modern Science-Intensive Technologies*, 2013, no. 5, pp. 111–115. (In Russ.)
21. Logvinenko O.V., Timkin T.V. Material composition and sequence of mineralization of the Log-26 ore occurrence of the Topolninskoye gold ore field (Gorny Altai). *Bulletin of Tomsk State University*, 2014, no. 383, pp. 212–220. (In Russ.)
22. Okulov A.V., Shatilova L.V., Rozhchenko V.A. Mineralogical and geochemical characterization of gold ore occurrences of the Topolninskoye ore field. *Ores and Metals*, 2016, no. 1, pp. 52–62. (In Russ.)
23. Volkov V.A., Genkin A.D., Goncharov V.I. On the forms of gold occurrence in the ores of the Natalkinskoye and Mayskoye deposits. *Pacific Geology*, 2006, vol. 25, no. 6, pp. 18–29. (In Russ.)
24. Arkhipov G.I. *Mineral resources of the mining industry of the Far East. Review of the state and opportunities for development*. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2011. 830 p. (In Russ.)
25. Palyanova G.A. Gold and silver minerals in sulfide ores. *Geology of Ore Deposits*, 2020, vol. 62, no. 5, pp. 426–449. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016777020050056
26. Petrovskaya N.V. *Native gold (general characterization, typomorphism, genesis issues)*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 349 p. (In Russ.)
27. Yushkin N.P. *Nanominalogy. Ultra- and microdisperse state of mineral matter*. St Petersburg, Nauka Publ., 2005. 581p. (In Russ.)
28. 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*. Ed. by A.I. Chernykh. Moscow, TsNIGRI Publ., 2023. 74 p. (In Russ.)
29. Zorin A.S. Electric pulse discharging technology of crushing of solid dielectric materials. Factors influencing the dynamics of discharge processes. *Proc. of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Technical Sciences*, 2022, vol. 13, no. 3, pp. 87–96. (In Russ.) DOI: 10.37614/2949-1215.2022.13.3.009.
30. Kurec V.I., Usov A.F., Cukerman V.A. *Electric pulse desintegration of materials*. Apatity, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publ. house, 2002. 324 p. (In Russ.)
31. Yutkin L.A. *Electrohydraulic effect and its application in industry*. St Peterburg, Mechanical engineering Publ., 1986. 252 p.
32. Rudashevsky V.N., Rudashevsky N.S., Antonov A.V., Nabiullin F.M., Pastuhov D.M. Technological mineralogy of gold. *Proceedings of the Russian Mineralogical Society*, 2017, vol. 146, no. 1, pp. 125–147. (In Russ.)
33. 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 Russ.)
34. Lichmanova A.I. Application of ultrasound in soil preparation for mechanical analysis. *Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Institute*, 1972, Iss. 4, pp. 42–47. (In Russ.)
35. Rudashevsky N.S., Rudashevsky V.N. *Hydraulic classifier*. Patent RF no. 2281808, 2006. (In Russ.)

36. Lastra R., Price J., Cabri L.J., Rudashevsky V.N., McMahon G. 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. G. Deschênes, D. Houdin, L. Lorenzen. 2005, vol. 44, pp. 17–29.
37. Rudashevsky N.S., Nielsen T.F.D., Rudashevsky V.N. The PGE-Au mineralisation of the Skaergaard intrusion: precious metal minerals, petrography and ore genesis. *GEUS Bulletin*, 2023, vol. 54. DOI: 10.34194/geusb.v54.8306
38. Lodejshchikov V.V. *Technology of gold and silver extraction from refractory ores*. Irkutsk, Irgiredmet Publ., 1999. 775 p. (In Russ.)
39. Sekisov G.V., Sobolev A.A., Nigaj E.V. Types of small-scale gold deposits in the Far East region and the main directions of their rational development. *Mining information and analytical bulletin*, 2011, no. 2, pp. 192–201. (In Russ.)
40. Gül A., Kangal O., Sirkeci A.A., Önal G. Beneficiation of the gold bearing ore by gravity and flotation. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 106–110. DOI: 10.1007/s12613-012-0523-4.
41. Evdokimov S.I., Golikov N.S., Zadkov D.A., Voitovich E.V., Kondratiev V.V., Petrovskiy A.A., Konyukhov V.Y., Gladkikh V.A. Studying the flotation of gold-bearing ores using carrier minerals. *Minerals*, 2024, vol. 14, no. 1:88. DOI: 10.3390/min14010088.
42. Zhang J., Zhang Y., Richmond W., Wang H-p. Processing technologies for gold-telluride ores. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2010, vol. 17, no. 1, pp. 1–10. DOI:10.1007/s12613-010-0101-6.

Information about the authors

Aleksandr V. Chumakov, Postgraduate Student, St Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya embankment, St. Petersburg, 199034, Russian Federation; tchumakov.a.v@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0000-4311-9130>

Elena G. Panova, Dr. Sc., Professor, St Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya embankment, St. Petersburg, 199034, Russian Federation; e.panova@spbu.ru

Oleg V. Alikin, Head of the Technological Mineralogy Laboratory, CNT Instruments LLC, 69, lit, I, Revolutsii highway, St. Petersburg, 195275, Russian Federation; o.v.alikin@yandex.ru

Vladimir N. Rudashevsky, Cand. Sc., CEO, CNT Instruments LLC, 69, lit, I, Revolutsii highway, St. Petersburg, 195275, Russian Federation; vlad.rudashevsky@gmail.com

Boris M. Osovetskiy, Dr. Sc., Professor, Perm State University, 15, Bukirev street, Perm, 614990, Russian Federation; opal@mail.ru

Received: 22.07.2024

Revised: 10.09.2024

Accepted: 13.05.2025