

СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 553.411 (571.51)

**Золотосульфидное месторождение Попутнинское
(Енисейский край)****Козлов Н. Н.¹, Волков А. В.², Мурашов К. Ю.²**¹ ООО «УК Полюс», г. Москва, Россия;² ИГЕМ РАН, г. Москва, Россия

Аннотация. Попутнинское – ведущее по запасам золотосульфидное месторождение на юге Енисейского края. Оно контролируется Мамонско-Рыбинским разломом и приурочено к осевой части Рыбинской горст-антиклинали в ассоциации с метавулканическими породами. Руды локализованы в тальк-карбонат-хлоритовых сланцах – продуктах метаморфизма метапикробазальт-базальтовой ассоциации. Оруденение связано с зонами метасоматитов и прожилкового окварцевания; рудные тела – линзовидно-ленточные залежи дробления и рассланцевания. Золото распределено неравномерно, развита кора выветривания мощностью 10–60 м. Первичные руды содержат 3,4–11,2 % сульфидов и подразделяются на два геохимических типа: Au-As (в долеритах и углеродистых сланцах) и Au-As-Sb-Cr-Ni-Co (вдоль контакта с основными метавулканическими породами). Самородное золото мелкое, высокопробное, 40–60 % его ассоциировано с сульфидами. Результаты работы могут быть использованы при металлогенических прогнозах и поисках новых объектов на Енисейском крае.

Ключевые слова: Енисейский край, Раздолинский рудный узел, Попутнинское месторождение, прожилково-вкрапленные руды, сульфиды, самородное золото, геолого-генетическая модель.

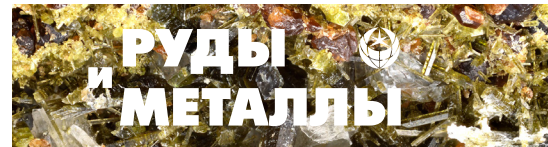
Для цитирования: Козлов Н. Н., Волков А. В., Мурашов К. Ю. Золотосульфидное месторождение Попутнинское (Енисейский край). Руды и металлы. 2026. № 2. С. 52–69. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10009.

The Poputninskoe gold-sulfide deposit, Yenisei Ridge**Kozlov N. N.¹, Volkov A. V.², Murashov K. Yu.²**¹ Polyus Management Company LLC, Moscow, Russia;² Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry (IGEM) of the RAS, Moscow, Russia

Annotation. The Poputninskoe gold-sulfide deposit is the largest one in terms of mineral reserves in the southern Yenisei Ridge. The deposit is controlled by the Mamonsko-Rybinsky fault and confined to the axial part of the Rybinsky horst-anticline, in association with metavolcanic rocks. The ores are hosted by talc-carbonate-chlorite schists that represent products of metamorphism of the metapicrobasalt-basalt association. The mineralization is related to zones of metasomatites and veinlet silicification; the ore bodies are lensoid-ribbon-shaped zones of crushing and schistosity. Gold is irregularly distributed; a weathering crust of up to 10–60 m thick is developed. The primary ores contain 3.4–11.2 % sulfides and are subdivided into two geochemical types: Au-As (in dolerites and carbonaceous schists) and Au-As-Sb-Cr-Ni-Co (along the basic metavolcanics contact). Native gold is fine-grained, high-fineness; 40–60 % of the gold is associated with sulfides. The results can be used in metallogenic forecasting and prospecting for new gold deposits in the Yenisei Ridge.

Keywords: Yenisei Ridge, Razdolinsky ore cluster, Poputninskoe gold deposit, veinlet-disseminated ores, sulfides, native gold, geological-genetic model.

For citation: Kozlov N. N., Volkov A. V., Murashov K. Yu. The Poputninskoe gold-sulfide deposit, Yenisei Ridge. Rudy i metally (Ores and metals). 2026. No. 2. pp. 52–69. DOI: 10.47765/0869-5997-2026-10009.



Введение

Месторождение Попутнинское расположено в Мотыгинском районе Красноярского края, в южной части Енисейского края (рис. 1, врезка). Геологическое изучение района началось в 40-х годах XIX столетия. Рудное золото на площади будущего Попутнинского месторождения впервые выявлено в 1886 г. в плотике разреза Козьмо-Демьяновского прииска (Хилковская жила). Золотокварцевая жила имела мощность 1,4 м и среднее содержание золота 51 г/т [11]. Эксплуатационные работы велись в течение шести лет, за весь период было добыто чуть больше 200 кг рудного золота.

В «Геологическом обзоре золотоносных районов Сибири» В. А. Обручев сообщает: «Но хотя открытие Хилковской жилы надѣлало много шума въ тайгѣ... никто не пожелалъ затрачивать даже и малые средства на развѣдку занятыхъ подѣ рудное золото площадей, такъ какъ сложилось убѣжденіе, что мѣстныя золотоносныя жилы съ углубленіемъ быстро становятся бѣдными и тонкими и разработки не окупаютъ» [9].

Геологическое изучение района месторождения с перерывами продолжалось с 1957 г. по настоящее время. В 2005 году компания «Полюс» приобрела лицензию на геологическое изучение, разведку и добычу рудного золота в пределах Раздолинского рудного узла, включающего Попутнинское месторождение. В результате нескольких этапов разведочных работ, проведенных в период 2005–2017 гг. на месторождении Попутнинское, получен шестикратный прирост запасов. Утвержденные балансовые запасы золота месторождения составляют 78 тонн [13]. Кроме того, в контуре лицензионной площади проведена оценка ещё трёх месторождений (Змеиное, Светлое, Антониновское), а также показаны высокие перспективы выявления промышленных объектов на флангах Попутнинского рудного поля.

Следует отметить, что результаты изучения Южно-Енисейского рудного района, Раздолинского рудного узла и Попутнинского месторождения представлены в опубликованной литературе явно недостаточно, особенно по сравнению с Северо-Енисейским золото-

рудным районом. Вместе с тем геологическое строение Южно-Енисейского района и его металлогения вызывают значительный интерес, так как в этом районе широко развиты метаморфизованные вулканогенно-осадочные рифейские толщи, вмещающие наряду с интрузивными телами силлы и дайки ультрабазитов и базитов, что позволяет предположить наличие зеленокаменного пояса и присущих последнему типов золотой минерализации [15].

В настоящей работе проанализированы опубликованные статьи и доступные фондовые материалы по геологии и золотоносности Раздолинского рудного узла и месторождения Попутнинское. Кроме того, в статье рассмотрены результаты изучения минералогии и геохимии руд, выполненного в ИГЕМ РАН. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения геолого-генетической и прогнозно-поисковой модели месторождений золота в Южно-Енисейском рудном районе.

Положение в региональных структурах

В современных представлениях большинства исследователей Енисейский край рассматривается в качестве аккреционно-коллизийной структуры юго-западного складчатого обрамления Сибирского кратона (рис. 1, врезка). Строение края интерпретируется в рамках двух концепций: террейнов и суперконтинентальных циклов [6].

В западной части Енисейского края, согласно предшествующим исследованиям [10, 12], блоки, сложенные вулканическими комплексами, представляют собой фрагмент островодужной системы, а с востока – область окраинного моря, которая в нижнем–среднем рифее развивалась в режиме пассивной континентальной окраины, а в среднем–позднем рифее – в режиме задугового бассейна.

Подавляющее число золоторудных месторождений Енисейского края локализуется в терригенно-вулканогенных отложениях нижних и средних горизонтов сухопитской серии на уровне кординской, горбилокской и удейской свит. Рифтогенез в раннем мезопротерозое неразрывно связан с влиянием системы Татарского и Ишимбинского глубинных

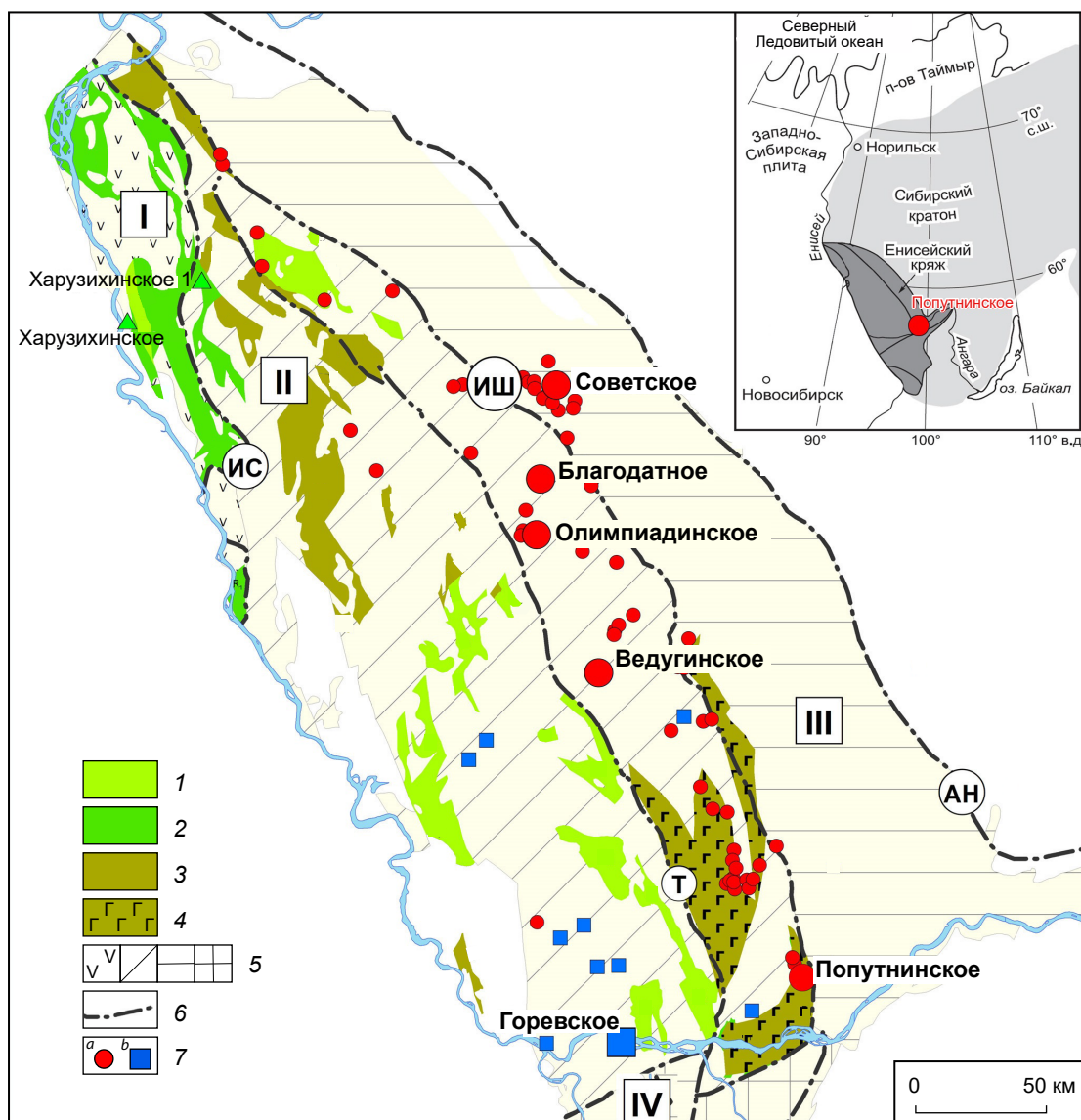
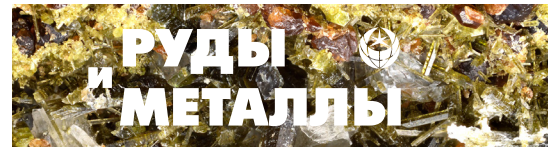


Рис. 1. Вулканогенные формации Енисейского кряжа и размещение золоторудных и полиметаллических месторождений (по [8] с изменениями):

1–4 – вулканогенные формации: 1 – поздний рифей (сурнихинская свита), 2 – ранний рифей (фирсовская, торжихинская, киселихинская, отравихинская свиты), 3 – ранний протерозой (печенгинская свита), 4 – Рыбинско-Панимбинский вулканический пояс (рыбинская и панимбинская толщи); 5 – террейны: I – Исаковский, II – Центрально-Ангарский, III – Восточно-Ангарский, IV – Ангаро-Канский; 6 – разломы: ИС – Исаковский, Т – Татарский, ИШ – Ишимбинский, АН – Анкиновский; 7 – месторождения: а – золоторудные, б – свинцово-цинковые

Fig. 1. Volcanogenic formations of the Yenisei Ridge and distribution of gold and polymetallic deposits (modified after [8]):

Volcanogenic formations: 1 – Late Riphean (Surnikha Formation), 2 – Early Riphean (Firsovskaya, Torzhikhinskaya, Kiselikhka, and Otravikhka formations), 3 – Early Proterozoic (Pechenginskaya Formation), 4 – Rybinsky-Panimbinsky volcanic belt (Rybinsky and Panimbinsky sequences); 5 – terranes: I – Isakovskiy, II – Central Angarsky, III – Eastern Angarsky, IV – Angara-Kansky; 6 – faults: ИС – Isakovskiy, Т – Tatarsky, ИШ – Ishimbinsky, АН – Ankinovskiy; 7 – deposits: а – gold, б – lead-zinc



разломов. Глубоководные отложения нижних и средних горизонтов сухопитской серии имеют повышенную фоновую золотоносность, что определяет металлогеническую специфику Енисейского кряжа [8].

В основании рифейского бассейна располагался гетерогенный фундамент, образованный блоками архей-нижнепротерозойских, преимущественно гранитогнейсовых, образований и раннепротерозойских толщ карбонатно-вулканогенно-терригенной и карбонатно-терригенной формаций, формировавшихся в рифтогенных условиях (тейская серия).

Енисейский кряж представляет собой складчато-надвиговый пояс преимущественно СЗ простирания, расположенный в юго-западном обрамлении Сибирской платформы и вытянутый вдоль р. Енисей почти на 700 км при ширине от 50 до 200 км (рис. 1). Это сложное сооружение, включающее в себя Центрально-Ангарский, Восточно-Ангарский, Исаковский, Предивинский и Ангаро-Канский террейны [2, 3].

В центральной части Енисейского кряжа выделяется Рыбинско-Панимбинский вулканический пояс, прослеживающийся на расстоянии около 200–250 км. Выходы пород пикробазальт-базальтовой ассоциации этого древнейшего мезопротерозойского вулканического пояса приурочены к тектоническим зонам Татарско-Ишимбинской системы разломов (рис. 1). К этим зонам, нередко с повышенным фоном (кларком) золота, приурочены месторождения золота, сурьмы и реже колчеданно-полиметаллических руд [8].

Высокая магнезиальность пикробазальтов постоянно сопровождается повышенными концентрациями Cr, Co и Ni [8]. С северо-востока к этой толще примыкает интрузивное тело долеритов лендахского комплекса. Пикробазальт-базальтовая ассоциация Рыбинско-Панимбинского пояса отражает тектономагматические процессы, происходившие в пределах пассивной окраины Сибирского кратона и связанные со стадией активизации рифтинга раннедокембрийской континентальной коры на рубеже раннего и позднего докембрия.

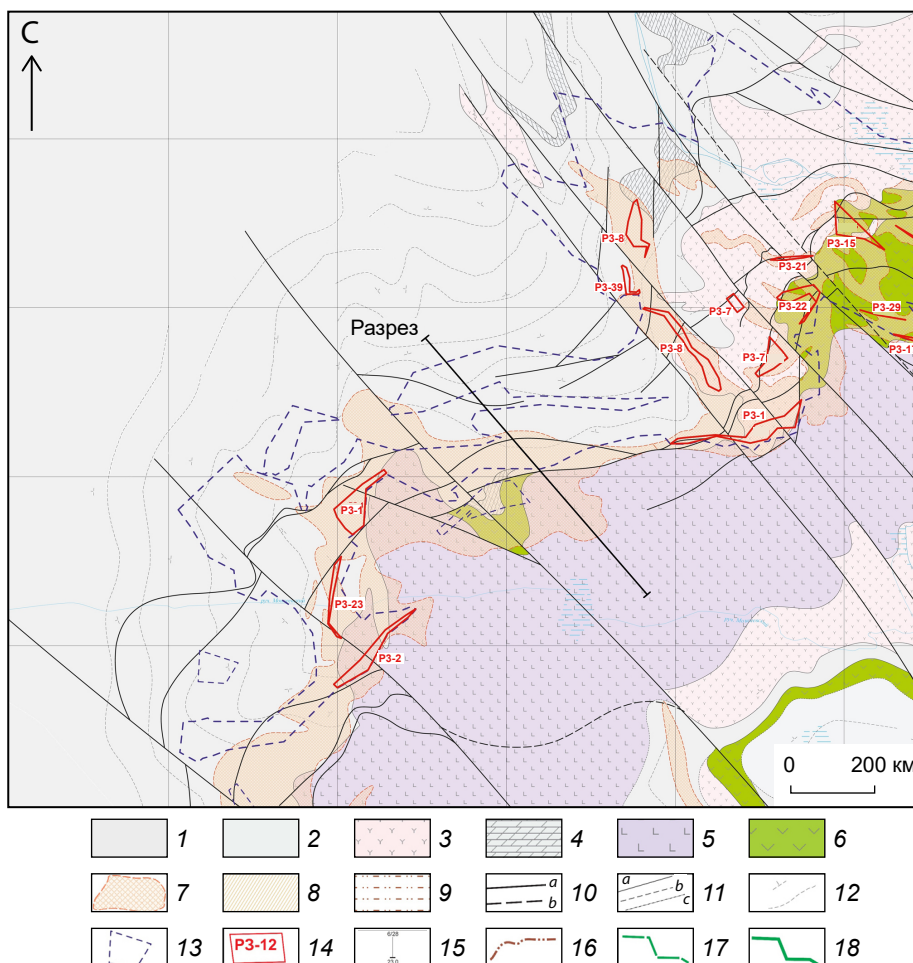
Структурно-тектоническая позиция Попутнинского месторождения определяется его положением в зоне влияния крупного Мамонско-Рыбинского разлома, оперяющего Ишимбинский глубинный разлом, в осевой части Рыбинской горст-антиклинали, в тесной ассоциации с интрузивными телами метаультрабазитов (рис. 1).

Рудовмещающие тальк-карбонат-хлоритовые сланцы представляют собой продукты метаморфизма метапикробазальт-базальтов – преимущественно высокомагнезиальных пород Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса (рис. 1). Эти породы представлены лавами, туфолавами, туфами и туфобрекчиями пикробазальтового, базальтового и изредка пикритового состава, среди которых развиты горизонты углеродистых сланцев. Породы метаморфизованы до зеленосланцевой (редко до эпидот-амфиболитовой) фации, включают гидротермально-изменённые зоны рассланцевания и дробления, местами насыщенные прожилково-вкрапленными сульфидами.

Геолого-структурные особенности месторождения

В геологическом строении Попутнинского месторождения принимают участие метаморфизованные отложения панимбинской толщи нижнего рифея, а именно углеродистые сланцы и туфосланцы с телами метавулкаников ультраосновного и основного состава – апоультрабазитовых сланцев и долеритов (рис. 2). Вмещающие породы метаморфизованы в хлоритовой субфации зеленосланцевой фации и в различной степени катаклазированы, милонитизированы и будинированы.

Выделяются следующие основные литологические типы вмещающих пород: сланцы переменного состава (*метаалевролиты, метаалевропелиты и метапелиты, филлитовидные сланцы и филлиты*, в разной степени углеродистые); метаморфизованные осадочно-вулканогенные породы (*туфосланцы, метатуффиты и метатуфы*, в разной степени углеродистые) и метавулканики ультраосновного состава (метаультрабазиты) –



хлорит-амфиболовые, тремолитовые и хлорит-талк-карбонатные апоультрабазитовые сланцы. Также наблюдаются на отдельных участках метавулканиты основного состава (метабазиты) – долериты, милонитизированные долериты, аподолеритовые карбонат-хлоритовые сланцы.

Сланцы переменного состава макроскопически представляют собой плотные породы серой, тёмно-серой окраски с неровно-сланцеватым или сланцеватым сколом и шелковистым блеском на плоскостях спайности. Они характеризуются микро- и тонкозернистой структурой, полосчатой, ритмично-полосчатой, иногда плейчатой текстурой. Состав пород преимущественно углеродисто-карбонат-кварц-серицитовый. Текстура сланцеватая, микро-структура бластоалевритовая, а в карбонатизированных, кливажированных разностях –

порфиробластовая с бластоалевропелитовой основной тканью. Минеральный состав: обломочные зёрна (кварц, полевые шпаты) – 20–45 % с цементом из гидрослюдисто-хлоритового агрегата – 50–60 %; присутствует углеродистое вещество – 1–2 %, сульфиды – ед. з., лейкоксен+рутил – 5 %; отмечается серицит-мусковит, циркон, турмалин, карбонат (до 5 %).

Метаморфизованные осадочно-вулканогенные породы имеют серую, тёмно-серую, зеленовато-серую, светло-зелёную окраску, сланцеватую, участками полосчатую, будинированную текстуру, обломочную структуру. Под микроскопом текстура неоднородная, сланцеватая, полосчатая (реликтовая слоистая), линзовидно-полосчатая, пятнистая. Микроструктура мелкопсефитовая литокластическая, бластопсаммоалевропелитовая, лепидобластовая, порфиробластовая с бластопелитовой основной



Рис. 2. Геологическая карта месторождения золота Попутнинское:

условные обозначения для рис. 2 и рис. 4: 1 – сланцы кварц-серицитовые, серицит-кварцевые, углерод-содержащие; 2 – сланцы кварц-серицитовые, хлорит-кварц-серицитовые, филлитовидные; 3 – метатUFFы основного состава, литокластические, средне- и крупнообломочные; 4 – доломиты вторичные, массивные и грубополосчатые; 5 – метавулканиды (сланцы карбонатно-хлоритовые, тальк-содержащие); 6 – метадолериты (массивные породы существенно карбонатно-хлоритового состава); 7 – сульфидсодержащие рудоносные метасоматиты и метасоматически изменённые породы (березиты, листовениты), часто прожилково-окварцованные (зоны рудоносных пород); 8 – элювиально-делювиальные глины и суглинки с щебнем и глыбами подстилающих коренных пород; 9 – суглинки, супеси, дресва и щебень остаточной коры выветривания, карстовые образования; 10 – зоны дизъюнктивных тектонических нарушений: а – установленные, б – предполагаемые; 11 – геологические границы между породами различного литологического состава: а – установленные, б – предполагаемые, с – между рыхлыми образованиями разного типа; 12 – структурные линии и ориентировочное положение простирания пород; 13 – проекции рудных залежей на дневную поверхность; 14 – контуры рудных залежей и их номера; 15 – скважины колонкового бурения, их номера и глубины (в метрах); 16 – ориентировочное положение границы распространения затронутых выветриванием пород и окисленных руд; 17 – контуры карьера, пройденного для отбора большеобъёмной технологической пробы; 18 – контуры проектного карьера

Fig. 2. Geological map of the Poputninskoe gold deposit:

Legend for figs. 2 and 4: 1 – quartz-sericite and sericite-quartz carbon-bearing schists; 2 – quartz-sericite, chlorite-quartz-sericite, and phyllitic schists; 3 – metatuffs of basic composition, lithoclastic, medium- and coarse-clastic; 4 – secondary dolomites, massive and coarse-banded; 5 – metavolcanites (carbonate-chlorite talc-bearing schists); 6 – metadolerites (massive rocks of essentially carbonate-chlorite composition); 7 – sulfide-bearing ore-bearing metasomatites and metasomatically altered rocks (beresites, listvenites), often with veinlet silicification (zones of ore-bearing rocks); 8 – eluvial-deluvial clays and loams with rubble and boulders of the underlying bedrock; 9 – loams, sandy loams, gruss and rubble of the residual weathering crust; karst formations; 10 – zones of disjunctive tectonic disturbances: (a) established and (b) inferred; 11 – geological boundaries between rocks of different lithological composition: (a) established, (b) inferred, and (c) between different types of unconsolidated formations; 12 – structural lines and approximate strikes of rocks; 13 – projections of ore bodies onto the daylight surface; 14 – outlines of ore bodies and their numbers; 15 – core boreholes, their numbers and depths (in meters); 16 – approximate position of the boundary of weathered rocks and oxidized ores; 17 – outlines of the quarry excavated for bulk technological sampling; 18 – outlines of the designed openpit mine

тканью, бластоалевропелитовая бластопсаммитовая кристаллолитокластическая, гранолепидобластовая. Обломочный материал представлен кристаллокластами кварца (1–15 %) и редко полевого шпата, обломками эффузивов, вероятно, кислого состава (0–40 %), кварцитов (0–15 %), светло-серых, серых, тёмно-серых метапелитов и чёрных углеродистых сланцев (5–7 %). Тонкозернистый, сланцеватый цемент состоит из карбонатизированной кварц-серицитовой, гидрослюдистой массы (до 80 %), хлорита (0–7 %), титанистых минералов (до 1 %). Отмечаются сульфиды (1–3 %), турмалин (0–3 %), единичные зёрна циркона и ильменита.

Метавулканиды ультраосновного состава (метавулканиды) – это в различной степени рассланцованные, милонитизированные породы, часто практически утратившие

исходные минеральный состав и структуру. Микроскопически в метавулканидах устанавливается крупноочковая, очково-сланцеватая, линзовидно-полосчатая или сланцевая текстура. Структура бластомилонитовая лепидогетерогранобластовая, реликтовая обломочная. Литокласты (10–90 %) расположены в сланцеватой основной ткани, состоящей из хлорита (хлорито-серпентина), карбоната, кварца. Основная ткань состоит из карбоната (35–65 %), хлорито-серпентина (10–55 %), талька (0–25 %), кварца (1–10 %) с примесью титанистых минералов (2–7 %), сульфидов (до 1 %). Сульфиды отмечаются в тальк-хлоритовой массе в виде редких зёрен пирита (до 1,5 мм) и субидиоморфных – герсдорфита (до 0,05–0,07 мм).

Метавулканиды основного состава (метавулканиды) представлены рассланцованными, милонитизированными изменёнными тёмными

Таблица. Химический состав вмещающих пород и метасоматитов месторождения Попутнинское

Table. Chemical composition of host rocks and metasomatites of the Poputninskoe deposit

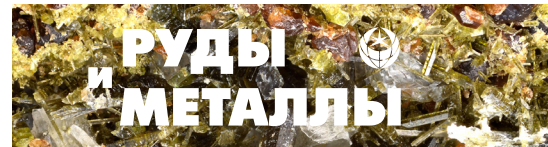
Наименование пород	Содержание в % на высушенное при 105 °С вещество										
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Сланцы тальк-карбонат-хлоритовые	35,58	0,33	7,08	9,41	8	0,15	10,64	17,22	0,06	0,02	0,05
Сланцы хлорит-амфиболовые	42,42	0,62	8,5	11,25	8,55	0,16	8,37	20,64	0,06	<0,02	0,03
Сланцы тальк-хлоритовые	41,28	0,66	10,21	12,02	9,69	0,16	6,69	18,89	0,06	0,03	0,05
Сланцы карбонат-хлоритовые	35,56	0,25	9,87	11,58	9,54	0,17	7,99	16,46	0,02	0,07	0,06
Сланцы карбонат-тальк-хлоритовые	40,18	0,19	8,6	11,11	8,92	0,13	4,02	23,17	0,03	<0,02	0,06
Метасоматиты фуксит-серицит-карбонат-кварцевые	76,44	0,12	9,44	2,35	1,36	0,05	2,24	1,57	0,71	1,98	0,03
Метасоматиты фуксит-карбонатные (по метавулканитам)	25,9	0,17	4,85	7,26	4,09	0,2	17,16	13,29	0,08	0,71	0,02
Метасоматиты кварц-серицит-карбонатные	35,58	1,33	13,9	18,98	8,89	0,18	4,57	4,37	0,37	3,24	0,08
Метасоматиты фуксит-кварц-карбонатные	30,42	0,22	4,85	7,47	6,1	0,14	12,21	14,59	0,08	0,66	0,02
Метасоматиты кварц-карбонат-серицитовые	34,7	0,68	10,8	17,64	4,73	0,17	8,32	3,78	0,12	2,5	0,09
Метасоматиты слюдисто-кварц-карбонатные	16,45	0,12	3,25	5,27	3,37	0,26	21,43	16,37	0,07	0,55	0,01

зеленовато-серыми сланцеватыми базальтовыми метапорфиритами (диабазы). Текстура прожилковая, сланцеватая, очково-сланцеватая, тонкополосчатая, трещиноватая, редко массивная. Структура апомикролитовая, бластофитовая, реликтовая микропорфировая с апомикролитовой основной массой, гломеропорфировая с апоинтерсертальной основной массой, бластомилонитовая. Минералогический состав: микропорфировые вкрапленники плагиоклаза – 0–15 %; основная масса: плагиоклаз – 5–40 %, актинолит – 0–55 %, карбонат – 10–50 %, хлорит – 15–45 %, эпидот-цоизит – до 5 %, пирит – до 1 %, пирротин – 0–5 %, лейкоксен и рутил – 2–10 %; отмечается карбонат, кварц, ильменит.

лейкоксен и рутил – 2–10 %; отмечается карбонат, кварц, ильменит.

Информация о химическом составе вмещающих пород и метасоматитов приведена в таблице. Описание гидротермально-местасоматических образований рассматривается далее в соответствующем разделе.

В региональном плане месторождение расположено в осевой части Рыбинской горст-антиклинали – крупной структуры северо-западного простирания. В пределах этой горст-антиклинали в зоне пересечения Мамонско-Рыбинского разлома с второстепенными нарушениями сформировалась локальная



структура более высокого порядка – брахи-антиклиналь (размером $\sim 2 \times 3$ км), которая и является основной рудоконтролирующей структурой месторождения. Залегание пород на её крыльях осложнено кольцевыми взбросо-надвигами, в результате чего получился так называемый сдвоенный разрез: в надрудной части месторождения оказались метапелиты нижнепанамбинской подтолщи и метаизвестняки второй подтолщи, в оруденелой – метатуффиты четвёртой подтолщи, метавулканиды попутнинского комплекса и субвулканические метадолериты исаковского комплекса, а в подрудной – вновь метатуффиты и метапелиты четвёртой подтолщи панамбинской толщи.

Массив пород, слагающих тело рудоносной брахиантиклинали, интенсивно дислоцирован. Наблюдаются как субсогласные тектонические нарушения, приуроченные к области контакта массива метаультрабазитов с метапелитами, преимущественно СВ простирания, так и нарушения СЗ направления, обусловленные проявлением поперечной складчатости. Структура Попутнинского месторождения определяется, таким образом, сочетанием продольных и поперечных пликтивных и дизъюнктивных нарушений и сопровождающих их зон метасоматической проработки. Поперечные складки имеют размах крыльев в несколько сотен метров и трассируются осевыми по отношению к ним дизъюнктивами. Эти дислокации обычно сопровождаются зонами смятия и мелкой складчатости, рассланцевания, милонитизации, брекчирования и будинажа. Последние являются благоприятной средой для развития гидротермально-метасоматических процессов.

Пространственные границы месторождения определяются контурами участков распространения метасоматически изменённых пород и зон прожилкового окварцевания, вмещающих золотосульфидную минерализацию в виде весьма неравномерной вкрапленности. Распределение этих участков, в свою очередь, определяется зонами пликтивных и дизъюнктивных дислокаций. В местах пересечения разнонаправленных структур от-

мечается наибольшая интенсивность метасоматических процессов. Эти участки являются наиболее продуктивными с точки зрения проявления золоторудной минерализации. И напротив, относительно обеднённые участки располагаются там, где роль поперечных дислокаций минимальна, а оруденение связано с субсогласными зонами, трассирующими контакт метавулканидов со сланцевой толщей.

Гидротермально-метасоматические образования

Попутнинское месторождение характеризуется разнообразными гидротермально-метасоматическими изменениями. Здесь имеет место магнезиальный метасоматоз с проявлением на отдельных участках тремолитизации, оталькования, интенсивной карбонатизации (доломит, анкерит) и лиственитизации (окварцевание, фукситизация, карбонатизация), натровый метасоматоз с проявлением на глубоких горизонтах кварц-альбитовых и альбит-карбонатных прожилков и альбитизации плагиоклазов и калиевый метасоматоз с образованием серицит-кварцевых метасоматитов, серицитолитов и различных березитоподобных пород. Вмещают золотосульфидную минерализацию метасоматиты березит-лиственитовой формации [5].

Метасоматиты по метаосадочным породам развиваются по углеродистым сланцам, метапелитам, метаалевропелитам, филлитам и филлитовидным сланцам (рис. 3, а). Выделены следующие разновидности:

- березиты кварц-серицитового (с пиритом 10–20 % и арсенопиритом до 10–15 %), серицитового (серицитолиты) (с пиритом 10–20 %), серицит-карбонатного до карбонат-серицитового состава (с пиритом 5–35 %);
- березитизированные углеродистые сланцы с пиритом 5–10 %;
- кливажированные окварцованные углеродистые сланцы с арсенопиритом до 10–15 %;
- березитоиды по долеритам кварц-карбонат-серицитового, серицит-карбонат-кварцевого состава с пиритом и арсенопиритом.



Листвениты и лиственитизированные метавулканииты образуют значительной мощности ореолы. Среди них выделены лиственитизированные метатуфы пикритов фуксит-кварц-карбонатного состава с пиритом до 10 %, кварц-фуксит-карбонатного (с пиритом до 7 % и арсенопиритом до 1 %), фуксит-кварц-карбонатного (с пиритом до 5–15 % и арсенопиритом до 1–3 %; рис. 3, б) и фуксит-карбонатного состава (с пиритом 1–10 % и арсенопиритом 0–10 %), метасоматиты по туфам кварц-серицит-карбонатного состава с пиритом 3–5 %. Содержание золота в лиственитах непостоянно, местами наблюдаются безрудные метасоматиты. Содержание золота резко возрастает в зонах трещиноватости с анкерит-кварцевыми, анкерит-полевошпатовыми жилами и прожилками, сопровождающимися антимонитовой минерализацией.

Морфология рудных тел

Рудные тела Попутнинского месторождения представляют собой золотосульфидные залежи (минерализованные зоны дробления и рассланцевания) сложной линзовидно-ленточной формы (рис. 2, 4, 5). Их контуры, обусловленные структурно-тектоническими особенностями месторождения, определяются только по результатам опробования. Рудная минерализация полностью локализована в метасоматитах разного состава, распределение которых связано со структурно-тектоническими особенностями месторождения.

В мощных телах рудовмещающих метасоматитов распределение рудных залежей не закономерно: последние располагаются как висячих, так и в лежащих боках этих тел, а также в их центральных частях. Концентрации золота в рудных залежах варьируют в широких пределах: от десятых долей до десятков г/т, а в отдельных пробах и до сотен г/т, что может указывать на наличие рудных столбов. Таким образом, для месторождения характерна разнообразная ориентировка рудных залежей в пространстве.

Всего установлено 46 рудных залежей, однако ~ 80 % запасов месторождения сосредоточено в рудных залежах 1, 7 и 8. Выделяется две группы залежей: первая – северо-восточ-

ного простирания с падением залежей 20–80° на СЗ, вторая – ЮВ направления с субвертикальным падением. Длина по простиранию обычно больше протяжённости по падению в несколько раз и достигает сотен метров.

Мощности рудных залежей меняются в широких пределах (от первых метров до 50 м и более). Размах по вертикали составляет 550–600 м. Распределение золота в контурах рудных залежей неравномерное: обогащённые интервалы чередуются с прослоями «пустых» пород.

Для золотосульфидных руд Попутнинского месторождения Ar-Ar методом был определён возраст формирования главной продуктивной ассоциации, представленной кварц-карбонат-фукситовыми метасоматитами с вкрапленностью сульфидов (арсенопирит, пирит, пирротин, халькопирит) и самородного золота. Полученный возраст серицита и фуксита из этих метасоматитов – 717 ± 6 и 712 ± 6 млн лет [8].

Кора выветривания

На месторождении Попутнинское широко развита кора выветривания. Её глубина различна и зависит как от особенностей состава подстилающих коренных пород, так и от степени их тектонической проработки; в среднем она колеблется в пределах 10–60 м. По рудной залежи 1 кора выветривания достигает 30 м (рис. 4). Наиболее подвержены окислению и аргиллизации карбонатные метасоматиты с сульфидной минерализацией; сульфиды и карбонаты в них, как правило, полностью выщелочены. С образованиями коры выветривания часто совмещены карстовые отложения, которые широко развиты в северной и северо-восточной части месторождения, где они контролируются толщей доломитов и зонами разломов. Здесь проявляются асимметричные карстовые полости, каверны и воронки глубиной до 100–150 м, заполненные песчано-глинистым и глинисто-дресвяно-щебнистым материалом, нередко с обломками субстрата (до глыб 1–3 м в поперечнике). В одной из карстовых воронок, совпадающей с окисленной частью рудной залежи 8, содержание золота достигает 124,1 г/т [5].

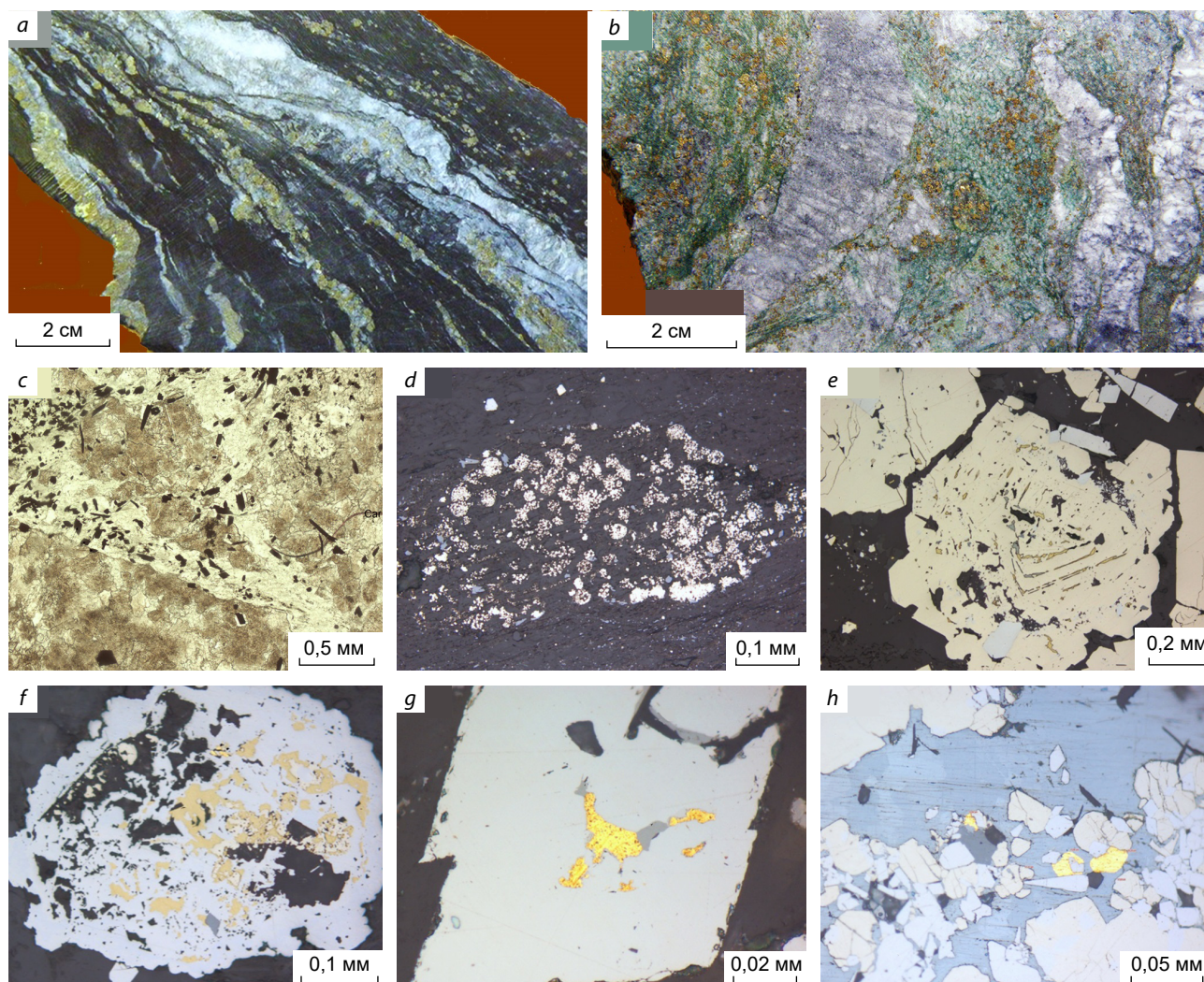


Рис. 3. Текстуры и минералы первичных руд Попутнинского месторождения:

a – филлит углерод-серицитовый турмалинсодержащий, линзовидно-сланцеватый, с многочисленными субсогласными пирит-мусковит-кварц-карбонатными прожилками; *b* – метасоматит карбонат-фукситовый рутил- и турмалинсодержащий (лиственит), пятнисто-сланцеватый, с вкрапленностью пирита (5–10 %, с оторочкой хлорито-серпентина) и антимонитом (до 1 %); *c* – по секущим микротрещинам (дорудной карбонатной жилки) развит серицит-мусковит с обилием арсенопирита; *d* – линза фрамбоидального (раннего) пирита; *e* – зоны роста в пирите; *f* – ксеноморфный агрегат герсдорфита с включениями; *g* – самородное золото в арсенопирите; *h* – самородное золото в антимоните

Fig. 3. The mineral structures and minerals of primary ores of the Poputninskoe deposit:

a – lensoid-schistose tourmaline-bearing carbon-sericite phyllite with numerous sub-concordant pyrite-muscovite-quartz-carbonate veinlets; *b* – spotted-schistose rutile- and tourmaline-bearing carbonate-fuchsite metasomatite (listvenite) with pyrite dissemination (5–10 %, with a chlorite-serpentine rim) and antimonite (up to 1 %); *c* – sericite-muscovite aggregate with abundant arsenopyrite, developed along cross-cutting microcracks in a pre-ore carbonate veinlet; *d* – lens of framboidal (early) pyrite; *e* – growth zones in pyrite; *f* – xenomorphic aggregate of gersdorffite with inclusions; *g* – native gold in arsenopyrite; *h* – native gold in antimonite

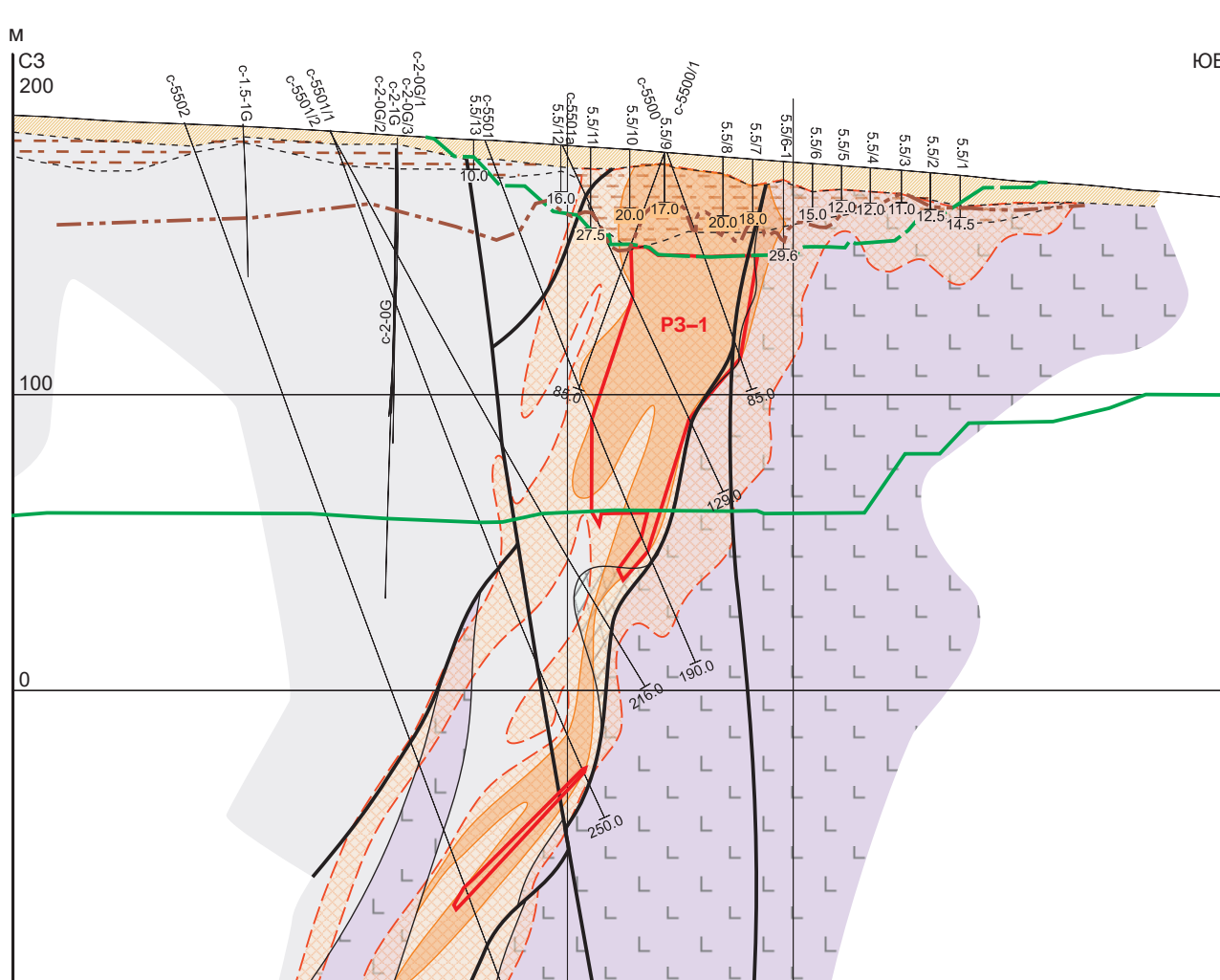


Рис. 4. Геологический разрез рудной залежи № 1 месторождения золота Попутнинское: условные обозначения см. на рис. 2

Fig. 4. Geological cross-section of Ore Body No. 1 of the Poputninskoe gold deposit: for Legend see Fig. 2

В коре выветривания за счёт выщелачивания карбонатов и сульфидов широко развиты гидроокислы железа (гётит, гидрогётит, ярозит при общем содержании железа 9,3–10,1 %), более высоким является содержание золота (в среднем 5 г/т), а также серебра (1–3 г/т). По данным химического анализа, для окисленных руд характерно повышенное содержание кремнезёма 52,74–66,4 %, пониженные более чем в два раза содержания CaO (0,08–2,3 %), очень низкое содержание серы от <0,1–0,46 до 1,43 %; содержание железа общего колеблется в пробах от 8,7 до 10,1 %, Al_2O_3 – 11,3–19,1 %. Основной ценный компонент – золото, попут-

ный – серебро. Из примесей в пробах отмечено незначительное содержание мышьяка (0,07–0,22 %) и сурьмы (0,012–0,1 %). Содержание элементов платиновой группы в пробах на пределе чувствительности.

Минералогические особенности руд

Проведённые исследования показали, что для первичных руд характерны вкрапленные (ориентированно-вкрапленная, гнездовокрапленная, редковкрапленная, мелко-вкрапленная и др.), прожилковые, прожилкововкрапленные, брекчиевые, брекчиевидные, пятнистые и другие текстуры. Наиболее

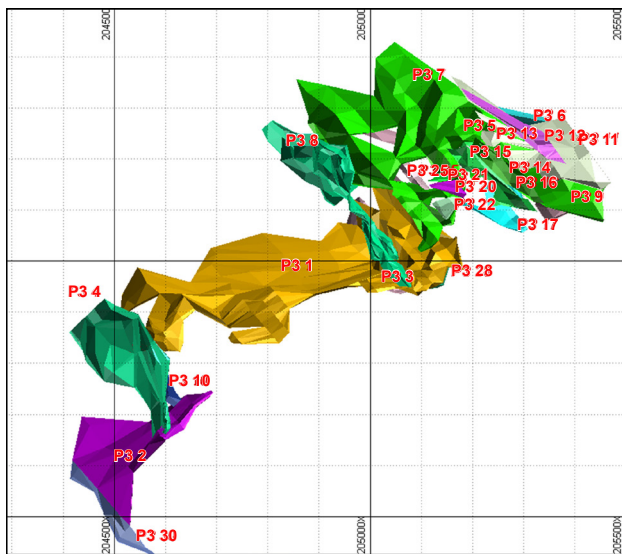
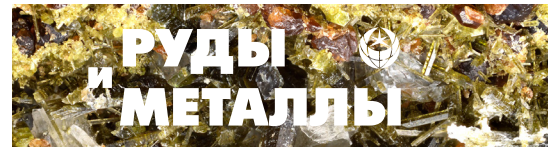


Рис. 5. Морфология рудных залежей (P3) Попутнинского месторождения (3D-модель; по [5], с изменениями)

Fig. 5. Morphology of ore bodies (OB) of the Poputninskoe deposit (3D model), modified after [5]

распространённые структуры рудных минералов: зернистые, метазернистые, структуры дробления, перекристаллизации, распада твёрдого раствора, реликтовые, каёмочные, сетчатые, сферолитовые, микросферолитовые и др. Первичные золотоносные руды содержат сульфиды в количестве от 3,4 до 11,2 %. Наиболее распространённые рудные минералы (в порядке уменьшения их распространённости): пирит, арсенопирит, кобальтин-герсдорфит, блёклая руда, халькопирит, сфалерит, антимонит, пирротин. В рудах выделяется четыре продуктивных минеральных ассоциаций.

Золото-арсенопирит-пиритовая ассоциация – одна из самых продуктивных, распространена в составе метасоматитов, образованных по сланцам. Представлена золотоносными метакристаллами пирита, преимущественно пентагондодекаэдрического габитуса (рис. 3, e). Встречаются также линзы фрамбоидального (раннего) пирита (рис. 3, d). Анализ монофракций пирита из технологических проб показал, что содержание самородного золота в них колеблется от 0,07 до 91,4 г/т при средней концентрации примерно 7 г/т. По данным анализов методом масс-спектрометрии, между содержаниями в

пирите мышьяка и золота можно видеть положительную корреляцию [5].

Главный золотоносный минерал – арсенопирит (рис. 3, c), образующий игольчатые, тонкопризматические и ромбовидные в сечении кристаллы. Кроме этих двух минералов, в состав ассоциации входят второстепенные и редкие: халькопирит, сфалерит, пирротин и самородное золото первой генерации. В технологических пробах количество арсенопирита оценивается в 0,8–1,2 %. Он образует рассеянную или ориентированную вдоль сланцеватости вкрапленность идиоморфных метакристаллов игольчатой или тонкопризматической формы, часто имеющей ромбовидное сечение, постоянно встречается в сростании с пиритом. Часто образует каёмки на зёрнах герсдорфита и сам обрастает герсдорфитом, иногда содержит внутри себя включения ассоциирующих с ним и более поздних минералов: пирита, халькопирита, герсдорфита, блеклой руды, углеродистого материала и самородного золота. По данным изучения отдельных зёрен из технологических проб, среднее содержание золота в арсенопирите составляет 72 г/т, варьируя в пределах 12–1170 г/т [5].

Золото-герсдорфит-блеклорудная – вторая продуктивная ассоциация, распространена главным образом в апоультрабазитовых сланцах, долеритах и метасоматитах по ним. Ведущий минерал в ассоциации – кобальтин-герсдорфит (рис. 3, g), второстепенный – блеклая руда (тетраэдрит). На северо-восточном фланге месторождения эта минеральная ассоциация встречается на небольших глубинах, в центральной части – на различных уровнях. Кобальтин-герсдорфит $(\text{Co}, \text{Ni}, \text{Fe})\text{AsS}$ – $(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Fe})\text{AsS}$ – минерал, характерный для кварц-фуксит-карбонатных метасоматитов, образованных по метабазитам и метаультрабазитам, – достаточно широко распространён, но больших концентраций не образует. Его содержание в аншлифах не превышает 1–2 % площади. В материале технологических проб содержание минерала не превышает 0,3–0,5 %. Самородное золото в составе герсдорфита имеет, как и в других сульфидах, очень мелкие размеры – от 0,5 до 8,0 мкм – и размещается, как правило, в сростании с включениями

блѣклой руды или в непосредственной близости от неё или от включений халькостибита и бурнонита.

Золото-сульфидно-полиметаллическая ассоциация имеет на месторождении ограниченное распространение и представлена мелкими кварцевыми, карбонатными и кварц-карбонатными прожилками, линзами и гнёздами, содержащими мелкую вкрапленность перекристаллизованного пирита третьей генерации и мелких выделений окружающих его сульфидов: халькопирита, блѣклой руды, сфалерита, бурнонита, ульманнита, галенита, а также самородного золота второй генерации.

Золото-бертьерит-антимонитовая ассоциация встречается в кварц-антимонитовых брекчиях, развитых в Центральной и Западной частях месторождения. Основные минералы – пирит поздней генерации, арсенопирит и антимонит. В небольшом количестве отмечаются бертьерит, джемсонит, буланжерит, халькопирит, сфалерит и самородное золото третьей генерации, редкий минерал – самородная сурьма. Самородное золото в антимоните – гипидиоморфной формы (рис. 3, *h*).

Практически всё самородное золото Попутнинского месторождения относится к разряду мелкого (размеры золотинок 0,001–0,070 мм; рис. 3, *g, h*), при этом достаточно большой процент является тонкодисперсным (выделения менее 0,001 мм). Пробность самородного золота высокая (рис. 5, *a*), в среднем 949 ‰, основная примесь – ртуть (2,37–4,12 ‰), количество меди – незначительно (0,01–0,06 ‰). По данным технологических исследований, в руде в доступной для цианирования форме находится 21,91 ‰ золота. Упорное золото ассоциировано в основном с сульфидными минералами – на 66,86 ‰, с оксидами и карбонатами – на 7,97 ‰, с кварцем – на 3,26 ‰ (рис. 3, *b*).

Выполненные исследования показали, что минералообразование на месторождении – многостадийное. *Дорудная стадия* представлена хлоритизацией, карбонатизацией и окварцеванием вмещающих пород, предшествующих отложению основной массы сульфидов. С ней связана халькопирит-пиритовая мине-

ральная ассоциация во главе с наиболее распространѣнным пиритом ранней генерации (рис. 3, *d*) и незначительным количеством ранних халькопирита, сфалерита и пирротина. *Рудная золото-кварц-сульфидная стадия* включает золото-арсенопирит-пиритовую, золото-герсдорфит-блеклорудную и золото-сульфидно-полиметаллическую. Завершался процесс минералообразования на месторождении самостоятельным *поздним этапом*, с которым связана золото-бертьерит-антимонитовая минеральная ассоциация (рис. 6).

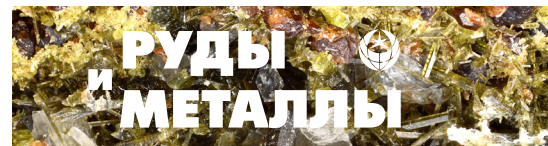
Для первичных руд характерны вкрапленные (ориентированно-вкрапленная, гнездово-вкрапленная, редковкрапленная, мелко-вкрапленная и др.), прожилковые, прожилково-вкрапленные, брекчиевые, брекчиевидные, пятнистые и другие текстуры.

Наиболее распространѣнные структуры рудных минералов: зернистые, метазернистые, структуры дробления, перекристаллизации, распада твѣрдого раствора, реликтовые, каѣмочные, сетчатые, сферолитовые, микросферолитовые.

В технологических пробах, исследованных в последние годы [5], основную массовую долю составляют оксиды кремния (SiO_2) и алюминия (Al_2O_3), содержание которых составляет от 38,30 до 41,00 % и от 4,30 до 5,39 % соответственно. Массовая доля серы общей – от 1,95 до 2,30 ‰, серы сульфидной – от 1,86 до 2,30 ‰. Массовая доля цветных металлов не представляет практического интереса и находится на уровне сотых, тысячных долей. Содержание золота в данных пробах от 2,55 до 4,70 г/т; содержание серебра во всех пробах – менее 1,0 г/т.

Условия рудообразования

Результаты комплексного исследования флюидных включений показали [4], что минералообразование на Попутнинском месторождении происходило с участием флюидов, описываемых системой $\text{CO}_2(\pm\text{CH}_4\pm\text{N}_2)\text{--H}_2\text{O--NaCl--KCl}(\pm\text{MgCl}_2\pm\text{FeCl}_2)$. Флюид рудной стадии захватывался при температурах 190–150 °С и характеризуется средней (умеренной) солѣностью (от 10,5 до 12,5 масс. % NaCl -экв.). Формирование кварцевых жил с антимонитом



Стадии Минералы	Дорудная	Рудная ранняя			Рудная поздняя	Гипергенез
	1	2	3	4	5	6
Пирит 1	■					
Пирит 2		■				
Пирит 3				■		
Пирит 4					■	
Арсенопирит		■				
Кобальтин			■			
Герсдорфит			■			
Блѣклая руда			■	■		
Халькопирит 1	■	■				
Халькопирит 2				■		
Халькопирит 3					■	
Сфалерит 1	■	■				
Сфалерит 2				■		
Антимонит					■	
Пирротин 1	■					
Пирротин 2		■				
Золото 1		■	■			
Золото 2				■		
Золото 3					■	
Галенит				■		
Бурнонит				■		
Бертьерит					■	
Ульманит				■		
Самородная сурьма					■	
Гѣтит						■
Ярозит						■
Гематит						■
Магнетит						■
Ковеллин						■
Самородная медь						■
Самородное золото						■

■ Ведущие минералы ■ Основные минералы ■ Редкие минералы

Рис. 6. Парагенетическая схема минералообразования:

минеральные ассоциации: 1 – халькопирит-пиритовая, 2 – золото-арсенопирит-пиритовая, 3 – золото-герсдорфит-блѣклорудная, 4 – золото-сульфидно-полиметаллическая, 5 – золото-бертьерит-антимонитовая, 6 – новообразованные минералы зоны окисления

Fig. 6. Paragenetic scheme of mineral formation:

mineral assemblages: 1 – chalcopyrite-pyrite, 2 – gold-arsenopyrite-pyrite, 3 – gold-gersdorffite-tetrahedrite, 4 – gold-sulfide-polymetallic, 5 – gold-bartyerite-antimonite, 6 – newly formed minerals of the oxidation zone



происходило при температурах 220–130 °С и давлениях 0,62–1,3 кбар. Солёность раствора достигает 23 масс. % NaCl-экв. В пострудный этап формирования секущих кварцевых жил и прожилков солёность раствора снижается и составляет 2–10,5 масс. % NaCl-экв. Температуры эвтектики водного раствора включений (–22...–30 °С) указывают на изменение состава системы ($\text{CO}_2\text{--H}_2\text{O--NaCl--KCl}$), преобладающую роль в которой теперь играют хлориды натрия и калия.

Модель рудообразования

В результате выполненных исследований представляется следующая модель формирования месторождения Попутнинское. Основными поставщиками Au, As и Ag в рудообразующую систему могли служить диагенетические сульфиды в карбонат-терригенной толще рифейского возраста, а Cr, Sb, Ni, Co и Te – породы метапикробазальт-базальтовой ассоциации Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса. Региональный метаморфизм вмещающих вулканогенно-осадочных пород в условиях фации зелёных сланцев стимулировал их перекристаллизацию, ремобилизацию и перераспределение сульфидов с сохранением слоистой текстуры. В результате этого процесса вмещающие породы были рассланцованы и перекристаллизованы совместно с заключёнными в них сульфидами. При этом происходили не только перекристаллизация сульфидов, но и высвобождение и миграция золота, мышьяка, серебра и других элементов. Полученные результаты соответствуют метаморфогенной модели формирования орогенных месторождений золота [1, 14].

Заключение

Золотосульфидное месторождение Попутнинское – крупнейшее в Раздолинском рудном узле, расположенном в южной части Енисейского кряжа. Структурно-тектоническая позиция Попутнинского месторождения определяется его положением в зоне влияния крупного Мамонско-Рыбинского разлома, оперяющего Ишимбинский глубинный разлом, в осевой части Рыбинской горст-антикли-

нали, в тесной ассоциации с интрузивными телами метаультрабазитов. Рудовмещающие тальк-карбонат-хлоритовые сланцы представляют собой продукты метаморфизма метапикробазальт-базальтовой ассоциации Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса.

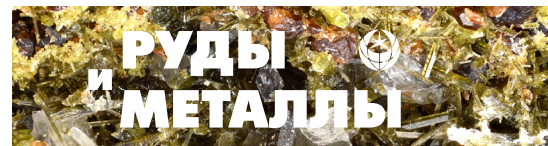
Пространственные границы месторождения определяются контурами участков распространения метасоматически изменённых пород и зон прожилкового окварцевания, вмещающих золотосульфидную минерализацию в виде весьма неравномерной многофазовой вкрапленности. Распределение этих участков, в свою очередь, обусловлено зонами пликативных и дизъюнктивных дислокаций, определяющих собственно структуру месторождения. Морфологически рудные тела Попутнинского месторождения представляют собой залежи – минерализованные золотосульфидные зоны дробления и рассланцевания сложной линзовидно-ленточной формы.

Распределение золота в контурах рудных залежей неравномерное. Широко развита кора выветривания, глубина которой колеблется в пределах 10–60 м. Первичные золотоносные руды содержат сульфиды в количестве от 3,4 до 11,2 %. Представлены руды двух различных геохимических типов: Au-As (в полях долеритов и углеродистых сланцев) и Au-As-Sb-Cr-Ni-Co (развиты вдоль контакта с метавулканитами основного состава). Самородное золото мелкое (0,001–0,070 мм) и высокопробное (936–969 ‰), 40–60 % его обнаружено в сульфидах.

Рудообразующий флюид месторождения Попутнинское обнаруживает сходство с флюидами известных месторождений Енисейского кряжа (Олимпиадинское, Ведугинское и др. [7]) и обладает большим сходством с флюидами орогенных месторождений золота [16].

Полученные результаты соответствуют метаморфогенной модели формирования орогенных месторождений золота [1, 14].

Приведённая в статье информация может найти применение в прогнозно-металлогенических построениях, поисках и оценках новых золоторудных месторождений на Енисейском кряже.

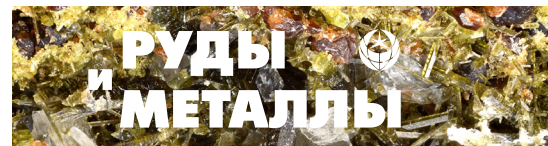


Список литературы

1. Буряк В. А. Метаморфизм и рудообразующие процессы. – М.: Наука, 1982. – 157 с.
2. Верниковский В. А., Верниковская А. Е. Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского кряжа // Геология и геофизика. – 2006. – Т. 47, № 1. – С. 35–52.
3. Верниковский В. А., Верниковская А. Е., Сальникова Е. Б., Бережная Н. Г., Ларионов А. Н., Котов А. Б., Ковач В. П., Верниковская И. В., Матушкин Н. Ю., Ясенов А. М. Позднерифейский щелочной магматизм западного обрамления Сибирского кратона: результат континентального рифтогенеза или аккреционных событий? // Доклады РАН. – 2008. – Т. 419, № 1. – С. 90–94.
4. Дашкевич Е. Г., Неволько П. А., Тимкина А. Л. Минералого-геохимические особенности руд и физико-химические условия формирования Попутнинского золоторудного месторождения (Енисейский кряж) // Металлогения древних и современных океанов–2011. Рудоносность осадочно-вулканогенных и гипербазитовых комплексов. Научное издание. – Миасс : ИМин УрО РАН, 2011. – С. 214–218.
5. Куйбида С. С., Кухаренко В. В., Анисимов И. А., Землянский С. А. Отчёт по объекту: «Разведка золоторудных объектов Раздолинского рудного узла». – Красноярск, 2019ф.
6. Лиханов И. И., Ножкин А. Д., Ревердатто В. В., Козлов П. С. Гренвильские тектонические события и эволюция Енисейского кряжа, западная окраина Сибирского кратона // Геотектоника. – 2014. – № 5. – С. 371–389. – doi: 10.7868/S0016853X1405004X. – EDN SLIQGP.
7. Неволько П. А. Геологические и физико-химические условия формирования сурьмяной минерализации на золоторудных месторождениях Енисейского кряжа : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Новосибирск : ИГМ СО РАН, 2009. – 16 с.
8. Ножкин А. Д., Борисенко А. С., Неволько П. А. Этапы позднепротерозойского магматизма и воз-
растные рубежи золотого оруденения Енисейского кряжа // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 1. – С. 158–181.
9. Обручев В. А. Геологический обзор золотоносных районов Сибири: Средняя Сибирь. – Петроград : Тип. «Якорь», 1915. – 92 с.
10. Сараев С. В. Седиментология и полезные ископаемые верхнерифейского окраинного бассейна Енисейского кряжа // Тез. докл. I Всерос. металлоген. совещ. «Металлогения складчатых систем с позиции тектоники плит». – Екатеринбург, 1994. – С. 97–98.
11. Сердюк С. С., Кириленко В. А. Геология и перспективы золотоносности южной части Южно-Енисейского рудного района // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2013. – № 6. – С. 968–994.
12. Стреляев В. И. О докембрийских геодинамических обстановках и металлогении южного сегмента Енисейского кряжа // Тез. докл. I Всерос. металлоген. совещ. «Металлогения складчатых систем с позиции тектоники плит». – Екатеринбург, 1994. – С. 99–101.
13. Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Красноярского края на 15.03.2021 г. – Санкт-Петербург : ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2021.
14. Goldfarb R. J., Groves D. I. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time // Lithos. – 2015. – V. 233. – P. 2–26. – doi: 10.1016/j.lithos.2015.07.011.
15. Kerrich R., Goldfarb R. J., Richards J. P. R. Metallogenic provinces in an evolving geodynamic framework // Economic Geology 100th Anniversary Volume. – Society of Economic Geologists, 2005. – P. 1097–1136.
16. Ridley J. R., Diamond L. W. Fluid Chemistry of Orogenic Lode Gold Deposits and Implications for Genetic Models // Reviews in Economic Geology. – 2000. – V. 13. – P. 141–162.

References

1. Buryak V. A. Metamorfizm i rudoobrazuyushchie protsessy [Metamorphism and ore-forming processes], Moscow, Nauka Publ., 1982, 157 p.
2. Vernikovskii V. A., Vernikovskaya A. E. Tektonika i ehvolyutsiya granitoidnogo magmatizma Eniseiskogo kryazha [Tectonics and evolution of granitoid magmatism of the Yenisei Ridge], *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 2006, Vol. 47, No 1, pp. 35–52. (In Russ.)
3. Vernikovskii V. A., Vernikovskaya A. E., Sal'nikova E. B., et al. Pozdnerifeiskii shchelochnoi magmatizm zapadnogo obramleniya Sibirskogo kratona: rezul'tat kontinental'nogo riftogeneza ili akkretsiionnykh sobytii? [Late Riphean alkaline magmatism of the Western framing of the Siberian Craton: Result of continental rifting or accretionary events?], *Doklady RAN* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences], 2008, Vol. 419, No 1, pp. 90–94. (In Russ.)
4. Dashkevich E. G., Nevol'ko P. A., Timkina A. L. Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti rud i fiziko-khimicheskie usloviya formirovaniya Poputninskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Eniseiskii kryazh) [Mineralogical and geochemical features of ores and physicochemical conditions of formation of the Poputninskoye gold deposit (Yenisei Ridge)]. In: Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov–2011. Rudonosnost' osadochno-vulkanogennykh i giperbazitovykh kompleksov. Nauchnoe izdanie [Metallogeny of ancient and modern oceans 2011. Ore content of sedimentary-volcanic and ultramafic complexes. Scientific publication], Miass, IMin UrO RAN [Institute of Mineralogy of the Urals Branch of RAS], 2011, pp. 214–218.
5. Kuibida S. S., Kukharensky V. V., Anisimov I. A., Zemlyanskii S. A. Otchet po ob"ektu: "Razvedka zolotorudnykh ob"ektov Razdolinskogo rudnogo uzla" [Report on the object: "Exploration of gold ore targets of the Razdolinsky ore cluster"], Krasnoyarsk, 2019.
6. Likhanov I. I., Nozhkin A. D., Reverdatto V. V., Kozlov P. S. Grenvil'skie tektonicheskie sobyitiya i ehvolyutsiya Eniseiskogo kryazha, zapadnaya okraina Sibirskogo kratona [Grenville tectonic events and evolution of the Yenisei Ridge, western margin of the Siberian craton], *Geotektonika* [Geotectonics], 2014, No 5, pp. 371–389. (In Russ.) DOI 10.7868/S0016853X1405004X, EDN SLIQGP.
7. Nevol'ko P. A. Geologicheskie i fiziko-khimicheskie usloviya formirovaniya sur'myanoi mineralizatsii na zolotorudnykh mestorozhdeniyakh Eniseiskogo kryazha [Geological and physicochemical conditions of antimony mineralization formation at gold deposits of the Yenisei Ridge], abstract of a PhD thesis in Geology and Mineralogy, Novosibirsk, IGM SB RAN, 2009, 16 p.
8. Nozhkin A. D., Borisenko A. S., Nevol'ko P. A. Ehtapy pozdneproterozoiskogo magmatizma i vozrastnye rubezhi zolotogo orudneniya Eniseiskogo kryazha [Stages of Late Proterozoic magmatism and age boundaries of gold mineralization in the Yenisei Ridge], *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 2011, Vol. 52, No 1, pp. 158–181. (In Russ.)
9. Obruchev V. A. Geologicheskii obzor zolotonosnykh raionov Sibiri: Srednyaya Sibir' [Geological Review of Gold-Bearing Regions of Siberia: Central Siberia], Petrograd, Yakor' Press, 1915, 92 p.
10. Saraev S. V. Sedimentologiya i poleznye iskopayemye verkhnerifeiskogo okrainnogo basseina Eniseiskogo kryazha [Sedimentology and Useful Fossils of the Upper Riphean Marginal Basin of the Yenisei Ridge]. In: Tezisy dokladov I Vserossiiskogo metallogenicheskogo soveshchaniya "Metallogeniya skladchatykh sistem s pozitsii tektoniki plit" [Abstracts of the reports of the 1st All-Russian metallogenic conference "Metallogenesis of folded systems from the standpoint of plate tectonics"], Ekaterinburg, 1994, pp. 97–98.
11. Serdyuk S. S., Kirilenko V. A. Geologiya i perspektivy zolotonosnosti yuzhnoi chasti Yuzhno-Eniseiskogo rudnogo raiona [Geology and prospects of gold content in the southern part of the South Yenisei ore region], *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii* [Journal of the Siberian Federal University. Engineering and Technologies], 2013, No 6, pp. 968–994. (In Russ.)
12. Strelyaev V. I. O dokembriiskikh geodinamicheskikh obstanovkakh i metallogenii yuzhnogo segmenta Eniseiskogo kryazha [On the Precambrian geodynamic settings and metallogeny of the southern segment of the Yenisei Ridge]. In: Tezisy dokladov I Vserossiiskogo metallogenicheskogo soveshchaniya "Metallogeniya skladchatykh sistem s pozitsii tektoniki plit" [Abstracts of the reports of



- the 1st All-Russian metallogenic conference "Metallogenesis of folded systems from the standpoint of plate tectonics"], Ekaterinburg, 1994, pp. 99–101.
13. Spravka o sostoyanii i perspektivakh ispol'zovaniya mineral'no-syr'evoi bazy Krasnoyarskogo kraya na 15.03.2021 g. [Information on the state and prospects for the use of the mineral resource base of Krasnoyarsk Krai as of March 15, 2021], St. Petersburg, FGBU VSEGEI Publ., 2021.
14. Goldfarb R. J., Groves D. I. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time, *Lithos*, 2015, Vol. 233, pp. 2–26. DOI 10.1016/j.lithos.2015.07.011.
15. Kerrich R., Goldfarb R. J., Richards J. P. R. Metallogenic provinces in an evolving geodynamic framework. In: *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, Society of Economic Geologists, 2005, pp. 1097–1136.
16. Ridley J. R., Diamond L. W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models, *Reviews in Economic Geology*, 2000, Vol. 13, pp. 141–162.

Козлов Николай Николаевич (morze49@inbox.ru)
старший эксперт по геологии месторождений ¹

Волков Александр Владимирович
доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН,
заведующий лабораторией, главный научный сотрудник ²

Мурашов Константин Юрьевич
научный сотрудник ²

¹ ООО «УК Полюс», г. Москва, Россия

² Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, г. Москва, Россия

Nikolay Nikolaevich Kozlov (morze49@inbox.ru)
Senior Expert in Deposit Geology ¹

Aleksandr Vladimirovich Volkov
Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of Laboratory, Chief Researcher ²

Konstantin Yurievich Murashov
Researcher ²

¹ Polyus Management Company LLC, Moscow, Russia;

² Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry (IGEM) of the RAS, Moscow, Russia