

Региональное положение и геолого-структурные особенности Попутнинского золоторудного месторождения (Енисейский кряж)

Козлов Н. Н.

ООО «УК Полюс», Москва, morze49@inbox.ru

Аннотация. Попутнинское золоторудное месторождение локализовано в южной части Енисейского кряжа. В металлогеническом плане Попутнинское месторождение расположено в пределах Раздолинского рудного узла Южно-Енисейского рудного района. Месторождение связано с метасоматически изменёнными отложениями и интрузивными телами метаультрабазитов нижнего рифея. Оруденение не имеет геологических границ и выделяется только по результатам опробования. Всего на месторождении выделяется 46 рудных залежей, которые имеют линейно вытянутую, линзообразную сложную форму. Около 80 % запасов месторождения сосредоточено в трех рудных залежах. 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. По количеству запасов промышленных категорий месторождение относится к крупным объектам.

Ключевые слова: Енисейский кряж, Раздолинский рудный узел, Попутнинское месторождение, золото рудное.

Regional location and geological and structural features of the Poputninskoye gold deposit (Yenisei Ridge)

Kozlov N. N.

Management company Polyus LLC, Moscow, morze49@inbox.ru

Abstract. The Poputninskoye gold deposit is located in the southern part of the Yenisei Ridge. In metallogenic terms, the Poputninskoye deposit lies within the Razdolinsky ore cluster of the South Yenisei ore district. The deposit is associated with metasomatically altered sediments and intrusive bodies of Lower Riphean meta-ultrabasites. The mineralization lacks distinct geological boundaries and identified solely based on assay results. A total of 46 ore bodies have been identified at the deposit, which have a complex, linearly elongated, lens-like shape. Approximately 80 % of the deposit's reserves are concentrated in 3 ore bodies. The thickness of the ore bodies varies widely (from a few meters to 50 m and more). The vertical extent reaches 550–600 m. The distribution of gold within the contours of the ore bodies is uneven. In terms of the volume of reserves in industrial categories, the deposit is classified as a large-scale asset.

Keywords: Yenisei ridge, Razdolinsky ore cluster, Poputninskoye deposit, gold ore deposit.

Введение

Месторождение Попутнинское расположено в Мотыгинском районе Красноярского Края, в южной части Енисейского кряжа (рис. 1 врезка).

Геологическое изучение района месторождения с перерывами продолжалось с 1957 г. по настоящее время. В 2005 г. 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 (Справка..., 2021). Кроме того, в контуре лицензионной площади проведена оценка еще трех 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 золоторудным районом. Вместе

с тем геологическое строение Южно-Енисейского района и его металлогения вызывают значительный интерес. Так как в этом районе широко развиты 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 (Kerrich R. et al., 2005).

С учетом выше отмеченного, в настоящей работе проанализированы опубликованные статьи и доступные фондовые материалы по геологии и золотоносности Раздолинского рудного узла и месторождения Попутнинское. 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 структурно-тектоническом плане месторождение Попутнинское локализовано в южной части Енисейского кряжа, представляющего собой складчато-надвиговый пояс преимущественно северо-западного простирания, расположенный в юго-западном обрамлении Сибирской платформы (рис. 1). Это сложное сооружение, включающее в себя Центрально-Ангарский, Восточно-Ангарский, Исаковский, Предивинский и Ангаро-Канский террейны (Верниковский, Верниковская, 2006; Верниковский и др., 2008).

По данным сейсмозондирования геологическое строение Енисейском кряжа трактуется как несколько покровно-складчатых зон, состоящих из надвинутых друг на друга с запада и юго-запада тектонических пластин.

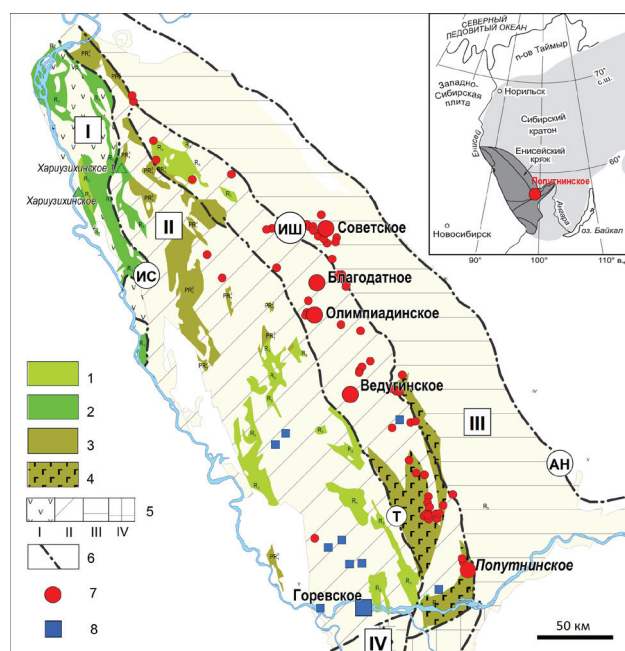


Рис. 1. Вулканогенные формации Енисейского Кряжа и размещение золоторудных и полиметаллических месторождений по (Ножкин и др., 2011) с изменениями. *Вулканогенные формации*: 1 – поздний рифей (сурнихинская свита); 2 – ранний рифей (фирсовская, торжихинская, киселихинская, отравихинская свиты); 3 – ранний 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, 8 – *месторождения*: 7 – золоторудные, 8 – свинцово-цинковые

Fig. 1. Volcanogenic formations of the Yenisei Ridge and the location of gold and polymetallic deposits according to (Nozhkin et al., 2011) with changes. *Volcanic formations*: 1 – Late Riphean (Surnikha Formation); 2 – Early Riphean (Firsovskaya, Torzhikhinskaya, Kiselikhinskaya, and Otravikhinskaya Formations); 3 – Early Proterozoic (Pechenginskaya Formation); 4 – Rybinsk-Panimbinsky Volcanic Belt (Rybinskaya and Panimbinskaya Formations); 5 – *terranes*: I – Isakovskiy, II – Central-Angarskiy, III – East-Angarskiy, IV – Angaro-Kanskiy; 6 – *faults*: Is – Isakovskiy, T – Tatar, Ish – Ishimbinskiy, An – Ankinovskiy. 7, 8 – *deposits*: 7 – gold ore, 8 – lead-zinc

В современных представлениях большинства исследователей Енисейский кряж рассматривается в качестве аккреционно-коллизийной структуры юго-западного складчатого обрамления Сибирского кратона (рис. 1, врезка).

На территории Енисейского кряжа учтены государственным балансом запасов более 200 месторождений золота, из которых 20 % это коренные месторождения, а 80 % – россыпи. Подавляющее число золоторудных месторождений Енисейского кряжа локализуется в терригенно-вулканогенных отложениях нижних и средних горизонтов сухопитской серии на уровне кординской, горбилокской и удерейской свит. Рифтогенез в раннем мезопротерозое неразрывно связан с влиянием системы Татарского и Ишимбинского глубинных разломов. Глубоководные отложения нижних и средних горизонтов сухопитской серии обогащены золотом, что определяет металлогеническую специфику Енисейского кряжа (Ножкин и др., 2011).

В Енисейском кряже наиболее крупные золоторудные месторождения расположены в зоне влияния Татарско-Ишимбинской рифтогенной структуры, расположенной между Татарским (с запада) и Ишимбинским (с востока) зонами глубинных разломов. К тектоническим зонам Татарско-Ишимбинской системы разломов приурочены выходы пород пикробазальт-базальтовой ассоциации мезопротерозойского Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса, которым контролируются размещение месторождений золота Южно-Енисейского рудного района, включая Попутнинское.

Геолого-структурные особенности месторождения

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

Выделяются следующие основные литологические типы вмещающих пород: сланцы перемного 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 метавулканиты ультраосновного состава (метаультрабазиты) – *хлорит-амфиболовые, тремолитовые и хлорит-тальк-карбонатные апоультрабазитовые сланцы*. Также наблюдаются на отдельных участках метавулканиты основного состава (метабазиты) – *долериты, милонитизированные долериты, аподолеритовые карбонат-хлоритовые сланцы*.

Взбросо-надвиговые дислокации преимущественно северо-восточного простирания расчленяют отложения панимбинской толщи, слагающие ядерную часть Рыбинской горст-антиклинали, на отдельные фрагменты. В пределах одного из таких блоков и локализовано месторождение Попутнинское (Куйбиди и др., 2019 ф). Основная структура – брахиантиклиналь (рис. 2). Залегание пород на ее крыльях осложнено кольцевыми взбросо-надвигами.

Пространственные границы месторождения определяется контурами участков распространения метасоматически измененных пород и зон прожилкового окварцевания, вмещающих золото-сульфидную минерализацию в виде весьма неравномерной вкрапленности (рис. 2, 3). Распределение этих участков, в свою очередь, определяется зонами пликативных и дизъюнктивных дислокаций, определяющих собственно структуру этого месторождения.

Гидротермально-метасоматические преобразования

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 метасомати-

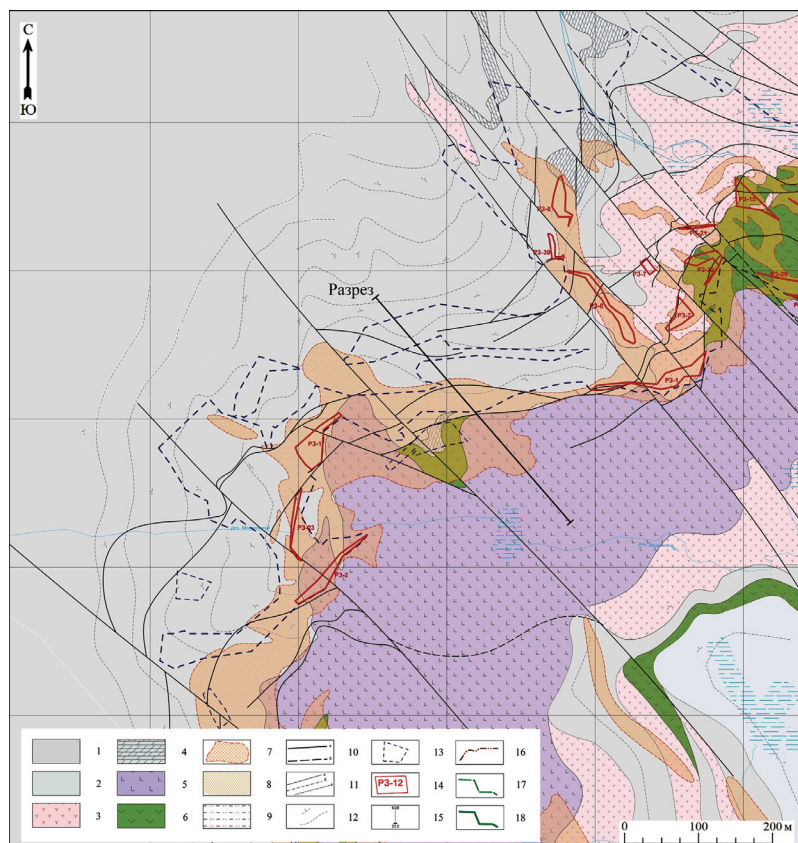
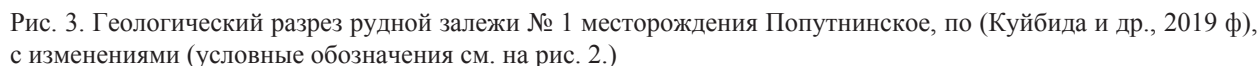


Рис. 2. Геологическая карта месторождения Попутнинское, по (Куйбида и др., 2019 ф), с изменениями. Условные обозначения для рис. 2 и 3: 1 – сланцы кварц-серицитовые, серицит-кварцевые, углеродсодержащие; 2 – сланцы кварц-серицитовые, хлорит-кварц-серицитовые, филлитовидные; 3 – метатUFFы основного состава, литокластические, средне- и крупнообломочные; 4 – доломиты вторичные, массивные и грубополосчатые; 5 – метаультрабазиты (сланцы карбонатно-хлоритовые, тальк-содержащие); 6 – метадиабазиты (массивные породы существенно карбонатно-хлоритового состава); 7 – сульфидсодержащие рудоносные метасоматиты и метасоматически измененные 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 установленные (а) и предполагаемые (б); 11 – геологические границы между породами различного литологического состава установленные (а), предполагаемые (б) и между рыхлыми образованиями разного типа (в); 12 – структурные линии и ориентировочное положение простирания пород (на плане); 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 большеобъемной технологической пробы; 18 – контуры проектного карьера

Fig. 2. Geological map of the Poputninskoye deposit, according to (Kuibida et al., 2019 f), with modifications. Legend for Fig. 2 and 3: 1 – Quartz-sericite, sericite-quartz, carbonaceous shales; 2 – Quartz-sericite, chlorite-quartz-sericite, phyllite-like shales; 3 – Basic metatuffs, lithoclastic, medium- and coarse-grained; 4 – Secondary dolomites, massive and coarse-banded; 5 – Metaultrabasites (carbonate shales-chlorite, talc-containing rocks); 6 – Metadiabasites (massive rocks of substantially carbonate-chlorite composition); 7 – Sulfide-containing ore-bearing metasomatites and metasomatically altered rocks (berezites, larch), often veined and quarried (zones of ore-bearing rocks); 8 – Eluvial-deluvial clays and loams with crushed stone and blocks of underlying bedrock; 9 – Loams, sandy loams, soil and crushed stone of the residual weathering crust; karst formations; 10 – Zones of disjunctive tectonic disturbances established (a) and assumed (b); 11 – Geological boundaries between rocks of different lithological composition established (a), assumed (b) and between loose formations of different types (c); 12 – Structural lines and the approximate position of the strike of rocks (on the plan); 13 – Projections of ore deposits on the day surface; 14 – Contours of ore deposits and their numbers; 15 – Core drilling wells, their numbers and depths (in meters); 16 – Approximate position of the boundary of the distribution of rocks affected by weathering and oxidized ores; 17 – Contours of the quarry traversed to take a large-volume technological sample; 18 – Contours of the design pit



тов, серицитолитов и различных березитоподобных пород. Вмещают золотосульфидную минерализацию метасоматиты березит-лиственитовой формации (Куйбида и др., 2019 ф).

Листвениты и лиственитизированные метавулканиды образуют значительной мощности ореолы. Среди них выделены лиственитизированные метатифы 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. 4 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.

Рудные тела Попутнинского месторождения представляют собой золотосульфидные залежи (минерализованные зоны дробления и рассланцевания), сложной линзовидно-ленточной формы

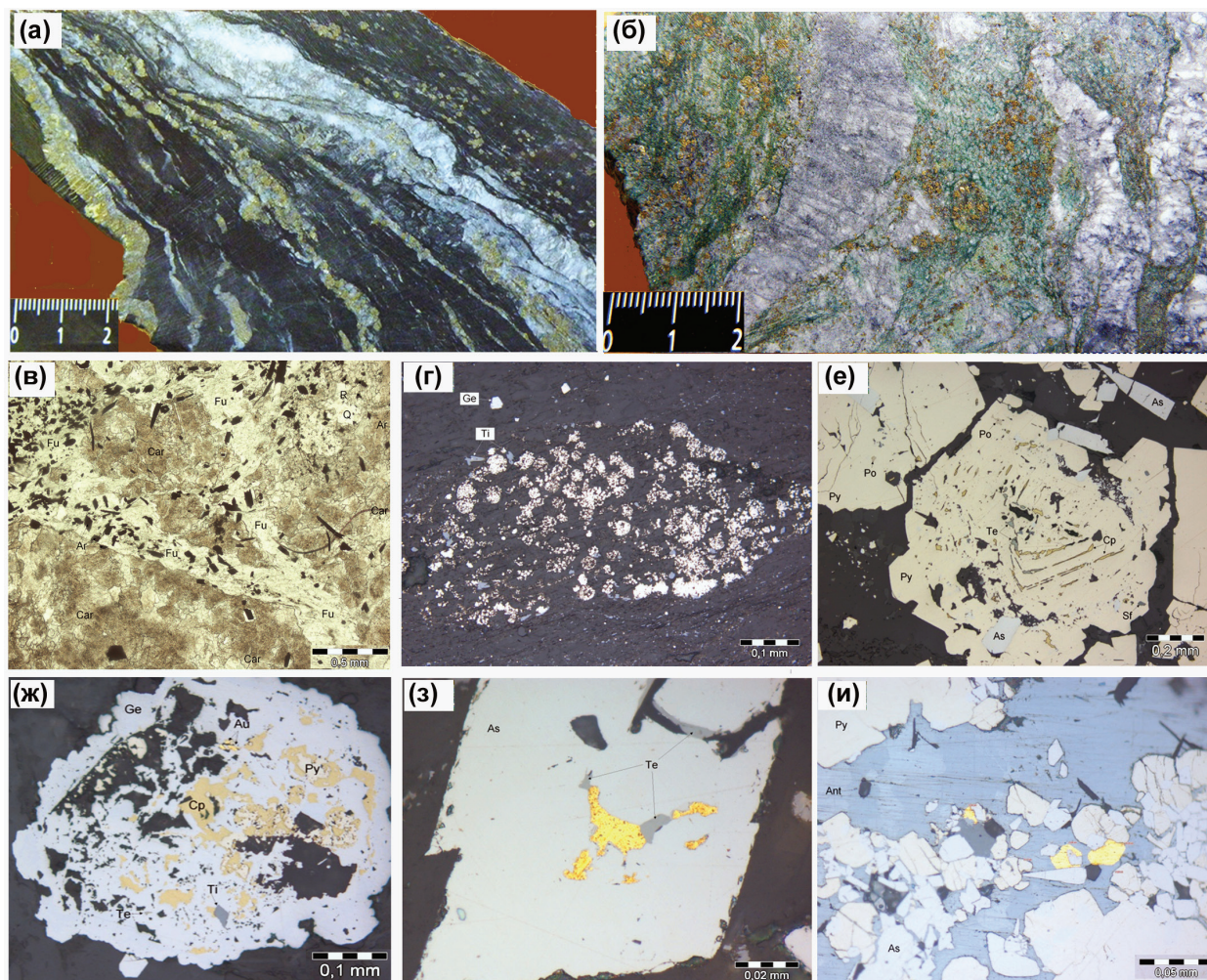


Рис. 4. Текстуры и минералы первичных руд Попутнинского месторождения по (Савушкина и др., 2008 ф): а – филлит углерод-серицитовый турмалинсодержащий, линзовидно-сланцеватый, с многочисленными субсогласными пирит-мусковит-кварц-карбонатными прожилками (обр. с-2-9G-415.5); б – метасоматит карбонат-фукситовый рутил- и турмалинсодержащий (лиственит), пятнисто-сланцеватый, с вкрапленностью пирита (5–10 %, с оторочкой хлорито-серпентина) и антимонитом (до 1 %) (обр. с-2-9G-439.9); в – по секущим микротрещинам (дорудной карбонатной жилки) развит серицит-мусковит с обилием арсенопирита (шлиф с-2-2G-356.7); г – линза фрамбоидального (раннего) пирита (анш. с-5501-88.2); е – зоны роста в пирите (анш. с-7753в-42.7); ж – ксеноморфный агрегат герсдорфита с включениями и две зоны кристалла герсдорфита (анш. с-6000-101.8); з – самородное золото в арсенопирите (анш. с-4-4G-170.3); и – самородное золото в антимоните (анш. с-7505-1-48.2)

Fig. 4. Textures and minerals of the primary ores of the Poputninskoye deposit, according to (Savushkina et al., 2008 f): а – carbon-sericite tourmaline-containing phyllite, lenticular-shale, with numerous sub-consistent pyrite-muscovite-quartz-carbonate veins (model c-2-9G-415.5); б – metasomatite carbonate-fuchsite rutile- and tourmaline-containing (larch), spotted-shale, with pyrite inclusions (5–10 %, with chlorite-serpentine edging) and antimonite (up to 1 %) (model S-2-9G-439.9); в – sericite-muscovite with an abundance of arsenopyrite is developed along secant microcracks (dorudic carbonate vein) (c-2-2G-356.7); г – lens of framboidal (early) pyrite (c-5501-88.2); е – growth zones in pyrite (c-7753b-42.7); ж – xenomorphic gersdorffite aggregate with inclusions and two zones of gersdorffite crystal (ansh. c-6000-101.8); з – native gold in arsenopyrite (ansh. c-4-4G-170.3); и – native gold in antimonite (ansh. c-7505-1-48.2)

(рис. 5). Их контуры, обусловленные структурно-тектоническими особенностями месторождения, определяются только по результатам опробования. Рудная минерализация полностью локализована в метасоматитах разного состава, распределение которых обусловлено структурно-тектоническими особенностями месторождения.

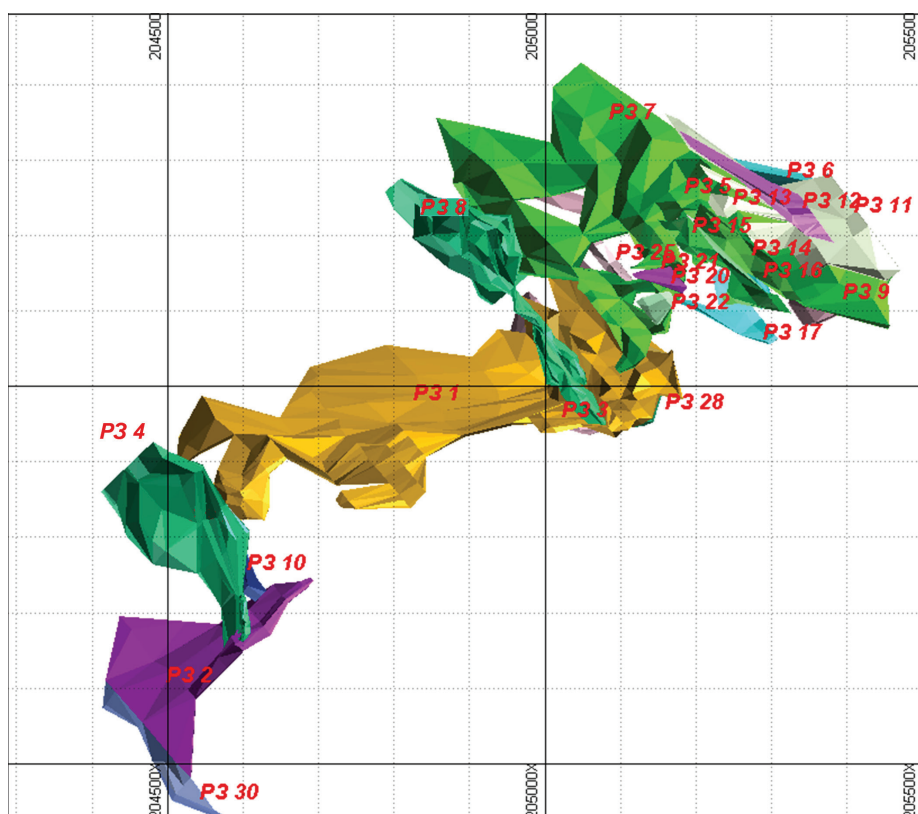


Рис. 5. Морфология рудных залежей (P3) Попутнинского месторождения (3D-модель), по (Куйбида и др., 2019 ф), с изменениями

Fig. 5. Morphology of ore deposits (OD) at the Poputninskoye deposit (3D model), according to (Kuibida et al., 2019 f), with modifications

Всего установлено 46 рудных залежей, однако, ~ 80 % запасов месторождения сосредоточено в рудных залежах 1, 7 и 8. Выделяется две группы залежей: первая – северо-восточного простирания с падением залежей 20–80° на СЗ; и вторая – ЮВ направления с субвертикальным падением. Длина по простиранию обычно больше протяженности 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: обогащенные интервалы чередуются с прослоями «пустых» пород.

Для золотосульфидных руд Попутнинского месторождения Ag-Ag методом был определен 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 (Ножкин и др., 2011).

Кора выветривания

На месторождении Попутнинское широко развита кора выветривания, глубина развития которой колеблется в пределах 10–60 м. 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-дресвянощепнистым 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 (Куйбида и др., 2019 ф).

В коре выветривания за счет выщелачивания карбонатов и сульфидов широко развиты гидроокислы железа (гетит, гидрогетит, ярозит при общем содержании железа 9.3–10.1 %), резко повышено содержание кремнезема (до 52–66 %), более высоким является содержание золота (в среднем 5 г/т), а также серебра (1–3 г/т). Основным ценным компонентом – золото, попутный – 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

Проведенные исследования показали, что для первичных руд характерны вкрапленные, прожилковые, прожилково-вкрапленные, брекчиевые, брекчиевидные, пятнистые и другие текстуры. Наиболее распространенные структуры рудных минералов: зернистые, метазернистые, структуры дробления, перекристаллизации, распада твердого раствора, реликтовая, каемочная, сетчатая, сферолитовая, микросферолитовая и др. Первичные золотоносные руды содержат сульфиды в количестве от 3.4 до 11.2 %. Наиболее распространенные рудные минералы (в порядке уменьшения их распространенности): пирит, арсенопирит, кобальтин-герсдорфит, блеклая руда, халькопирит, сфалерит, антимонит, пирротин. В рудах выделяется три продуктивных минеральных ассоциаций.

Золото-арсенопирит-пиритовая ассоциация – одна из самых продуктивных, распространенная в составе метасоматитов, образованных по сланцам кординской свиты. Представлена пиритом (рис. 4 е, г), арсенопиритом (рис. 4 в). 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 %. Образует рассеянную или ориентированную вдоль сланцеватости вкрапленность идиоморфных метакристаллов игольчатой или тонкопризматической формы, часто имеющей ромбовидное сечение, постоянно встречается в сростании с пиритом.

Золото-герсдорфит-блеклорудная – вторая продуктивная ассоциация распространена, главным образом, в апоультрабазитовых сланцах, долеритах и метасоматитах по ним. Ведущий минерал в ассоциации – кобальтин-герсдорфит (рис. 4 ж), второстепенный – блеклая руда (тетраэдрит). 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 распространен, но больших концентраций не образует. Включения самородного золота в герсдорфите имеют, как и в других сульфидах, очень мелкие размеры: от 0.5 до 8.0 мкм и размещаются, как правило, в сростании с включениями блеклой руды или в непосредственной близости от нее или от включений халькостибита и бурнонита.

Золото-бертьерит-антимонитовая ассоциация встречается в кварц-антимонитовых брекчиях. 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. 4 и).

Практически все самородное золото Попутнинского месторождения относится к разряду мелкого (размеры золотинок 0.001–0.070 мм (рис. 4 з, и). При этом достаточно большой процент является тонкодисперсным (выделения менее 0.001 мм). Пробность самородного золота высокая (рис. 6 а), в среднем 949 ‰ основная примесь – ртуть (2.37–4.12 %), количество меди – незначительно (0.01–0.06 %).

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 минеральная ассоциация во главе с наиболее распространенным пиритом ранней генерации (рис. 4 г) и незначительным количеством ранних халькопирита, сфалерита и пирротина. *Рудная золото-кварц-сульфидная стадия* включает золото-арсенопирит-пиритовую, золото-герсдорфит-блеклорудную, золото-сульфидно-полиметаллическую и кварц-карбонатную.

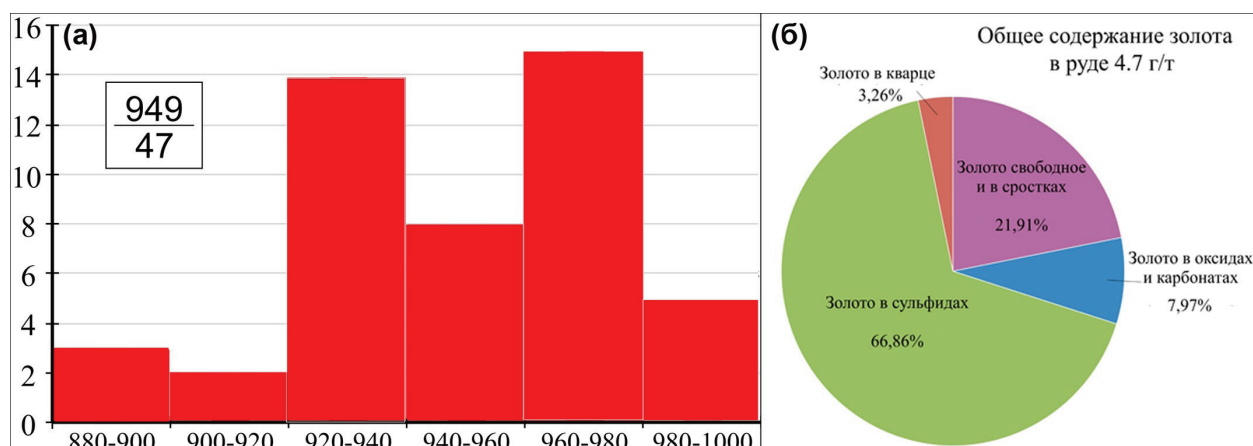


Рис. 6. Пробность (а) и формы нахождения самородного золота (б). По (Куйбиде и др., 2019 ф)

Fig. 6. Fineness of gold (a) and forms of native gold (б). According to (Kuibida et al., 2019 f)

Завершался процесс минералообразования на месторождении самостоятельным *поздним этапом*, с которым связана золото-бертьерит-антимонитовая минеральная ассоциация.

Условия рудообразования

Результаты комплексного исследования флюидных включений показали (Дашкевич и др., 2011), что минералообразование на Попутнинском месторождении происходило с участием флюидов, характеризующихся 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 высокой соленостью (от 10,5 до 12,5 мас. % NaCl-экв.). Формирование кварцевых жил с антимонитом происходило при температурах 220–130 °С и давлениях 0,62–1,3 кбар. Соленость раствора, достигает 23 мас. % NaCl-экв. В пострудный этап формирования секущих кварцевых жил и прожилков соленость раствора снижается и составляет 2–10,5 мас. % 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 модель формирования месторождения Попутнинское представляется следующим образом. 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 зеленых сланцев, стимулировал их перекристаллизацию, ремобилизацию и перераспределение сульфидов, с сохранением слоистой текстуры. В результате этого процесса вмещающие породы были рассланцованы и перекристаллизованы совместно с заключенными в них сульфидами. При этом происходила не только перекристаллизация сульфидов, но и высвобождение и миграция золота, мышьяка, серебра и других элементов. Полученные результаты соответствуют метаморфогенной модели формирования орогенных месторождений золота (Буряк, 1982; Goldfarb, Groves, 2015 et al.).

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, опоявающего Ишимбинский глубинный разлом, в осевой части Рыбинской горст-антиклинали, 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 определяется контурами участков распространения метасоматически измененных пород и зон прожилкового окварцевания, вмещающих золото-сульфидную минерализации. Распределение этих участков, в свою очередь, определяется зонами пликтивных и дизъюнктивных дислокаций, определяющих собственно структуру этого 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 (развитые вдоль контакта с метавулканиками основного состава). Самородное золото мелкое (0.001–0.070 мм) и высокопробное (936–969), в сульфидах – 40–60 %.

Рудообразующий флюид месторождения Попутнинское обнаруживает сходство с флюидами известных месторождений Енисейского края: Олимпиадинское, Ведугинское и других (Неволько, 2009), и с флюидами орогенных месторождений золота (Ridley, Diamond, 2000).

Полученные результаты соответствуют метаморфогенной модели формирования орогенных месторождений золота (Буряк, 1982; Goldfarb, Groves, 2015 et al.).

Приведенная информация может найти применение в прогнозно-металлогенических построениях, поисках и оценках новых золоторудных месторождений на Енисейском крае.

Литература

1. Буряк В. А. Метаморфизм и рудообразующие процессы. М. Изд-во: Наука, 1982. С. 157.
2. Дашкевич Е. Г., Неволько П. А., Тимкина А. Л. Минералого-геохимические особенности руд и физико-химические условия формирования Попутнинского золоторудного месторождения (Енисейский край) // Металлогения древних и современных океанов – 2011. Рудоносность осадочно-вулканогенных и гипербазитовых комплексов: Сб. науч. тр. XVII науч. молодежной школы. Миасс. Изд-во: Институт минералогии УрО РАН, 2011. С. 214–218.
3. Куйбида С. С., Кухаренко В. В., Анисимов И. А., Землянский С. А. Отчет по объекту: «Разведка золоторудных объектов Раздолинского рудного узла». Красноярск. 2019.
4. Неволько П. А. Геологические и физико-химические условия формирования сурьмяной минерализации на золоторудных месторождениях Енисейского края: автореф. дис. к.г.-м.н. Новосибирск. Изд-во: ИГМ СО РАН, 2009. С. 16.
5. Ножкин А. Д., Борисенко А. С., Неволько П. А. Этапы позднепротерозойского магматизма и возрастные рубежи золотого оруденения Енисейского края // Геология и геофизика. 2011. № 1. С. 124–143.
6. Савушкина С. И., Ахметвалеева Ю. З. Отчет о научно-исследовательской работе: «Характеристика вмещающих пород месторождения «Попутнинское». Красноярск. Изд-во: ЗАО «Полус», 2008.
7. Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Красноярского края на 15.03.2021 г. Санкт-Петербург. Изд-во: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2021.
8. Goldfarb R. J., Groves D. I. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time // Lithos. 2015. V. 233. P. 2–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.011>.
9. Ridley J. R., Diamond L. W. Fluid Chemistry of Orogenic Lode Gold Deposits and Implications for Genetic Models // SEG Reviews. 2000. V. 13. P. 141–162.