

Формы нахождения золота в рудах месторождения Сухое (Приморье)

Молчанов В.П. 

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, vpmol@mail.ru

Аннотация. На юге Дальнего Востока России выявлен новый для региона тип источников полезных ископаемых – зоны прожилково-вкрапленной минерализации, где благородный металл находится в рассеянном состоянии. Установлено, что золото присутствует в «невидимой» форме, концентрируясь в арсенопирите и мышьяковистом пирите в виде изоморфной примеси. Источником рудного вещества, как показал изотопный анализ серы сульфидов, были гранитоиды. Полученные данные открывают новые возможности для переоценки перспектив сырьевой базы драгоценных металлов Приморья.

Ключевые слова: прожилково-вкрапленные руды, «невидимое» золото, арсенопирит, пирит, минералогия, геохимия, изотопия, месторождение Сухое, юг Дальнего Востока.

Forms of finding gold in the ores of the Sukhoe deposit (Primorye)

Molchanov V.P. 

Far East Geological Institute, Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, vpmol@mail.ru

Abstract. In the south of the Russian Far East, a new type of mineral sources has been identified for the region – zones of streaked-interspersed mineralization, where the noble metal is in a dispersed state. It has been established that gold is present in an “invisible” form, concentrating in arsenopyrite and arsenic pyrite in the form of an isomorphic impurity. The source of the ore substance, as shown by isotopic analysis of sulfur sulfides, were granitoids. The data obtained open up new opportunities for revaluation of the prospects of the raw material base of precious metals of Primorye.

Keywords: veined-interspersed ores, “invisible” gold, arsenopyrite, pyrite, mineralogy, geochemistry, isotopy, Sukhoe deposit, south of the Far East.

Введение

Интенсивная эксплуатация рудных и россыпных месторождений благородных металлов на юге Дальнего Востока в течение многих десятилетий привела к значительному истощению их минерально-сырьевой базы (Моисеенко, 1977). Можно констатировать, что к настоящему времени практически полностью исчерпан поисковый задел перспективных площадей, созданный в советское время. Вместе с тем, есть основание полагать, что золотой потенциал региона далеко не исчерпан. Нужны новые подходы к прогнозу, поискам и освоению новых типов источников стратегических металлов. Один из них – прожилково-вкрапленные сульфидно-кварцевые руды с «невидимым» золотом, не выявляемым оптической или электронной микроскопией. Понятие «невидимое» золото подразумевает (Cabri, L.J. et al., 1989; Genkin, et al., 1998; Cabri, L.J. et al., 2000; Моисеенко, 2007) наноразмерное, коллоидальное, кластерное и химически связанное с сульфидными минералами. Примером тому может послужить месторождение Сухое, выявленное недавно вблизи г. Артема в районе с развитой инфраструктурой (Молчанов и др., 2022). К настоящему времени созрела острая необходимость его вовлечения в промышленный оборот. Присутствие «невидимого» золота значительно снижает степень извлечения металла, уходящего в отходы в процессе промышленной переработки руд традиционными методами. Необходимость детализации форм нахождения золота для разработки оптимальной схемы технологического передела руд месторождения Сухое послужила весомым основанием для проведения наших исследований.

Методы исследований

Анализ микроэлементного состава проб был выполнен на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) Agilent 750°С (Agilent Technologies, Япония), оборудованном распылителем Бабингтона, охлаждаемой распылительной камерой Скотта и заземленной горелкой Фассела.

Использовались никелевые конусы сэмплера и скиммера. Определение петрогенных элементов проводилось на атомно-эмиссионном с индуктивно связанной плазмой спектрометре iCAP 6500 Duo (ИСП-АЭС) (Thermo Scientific, США).

Минералогические исследования осуществлялись с применением электронно-зондового микроанализатора Jeol Superprobe JXA 8100 с системой INCA Energy 350 Oxford Instruments и электронного сканирующего микроскопа EVO-500XVP с системой INCA Energy 350 Oxford Instruments. Образцы для электронно-зондового микроанализа готовили в виде полированных шайб с запрессованными в них эпоксидной смолой минеральными зернами. Полученные искусственные монтировки предварительно изучались в отраженном свете оптического микроскопа. Далее на поверхности образцов в вакууме на установке CC 7650 (Quarum Technologies Ltd., Великобритания) напыляли проводящий слой углерода толщиной до 20 нм для последующих аналитических исследований. Для изучения особенностей распределения золота а сульфидах применялся рентгеновский микротомограф Sky Scan 1272.

Определение содержаний золота проводилось методом инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) на разработанной в Институте химии ДВО РАН компактной установке с радионуклеидным источником возбуждений на основе Cf-252 (Ivannikov, 2021).

Изотопный анализ серы сульфидов выполнен после соответствующей пробоподготовки мономинеральных проб. Измерение изотопных соотношений серы проведено на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (ThermoFinnigan, Bremen, Germany) с использованием двойной системы напуска. Определения изотопного состава приведены относительно лабораторного рабочего стандарта, калибровка которого выполнена с использованием международных стандартов IAEA-S-1, IAEA-S-2, IAEA-S-3 и NBS-123. Погрешность определения $\delta^{34}\text{S}$ составляла ± 0.1 ‰.

Объект и результаты исследований

Месторождение Сухое расположено на юге Приморья в 5 км на северо-восток от пос. Заводской, административно входящего в Артемовский городской округ (рис. 1). В соответствии со схемой тектонического районирования данная территория относится к Вознесенскому террейну Ханкайского супертеррейна. В геологическом строении площади рудопроявления принимают участие среднепермские вулканогенные и вулканогенно-осадочные образования владивостокской свиты, представленные лавами и туфами вулканитов кислого и среднего состава, переслаивающимися с маломощными прослоями песчаников, содержащих линзы конгломератов, а также терригенные породы нижнего и среднего триаса жидковской, каразинской и спутниковской свит. Триасовые отложения сложены частым переслаиванием алевролитов, песчанистых алевролитов, алевропесчаников и тонкозернистых песчаников. Породы содержат многочисленные остатки ископаемой фауны. На северо-востоке изученной площади вулканогенно-осадочные породы прорваны меловой интрузией гранитоидов.

В пределах рудопроявления породы владивостокской свиты слагают линейный блок шириной до 1.5 км северо-восточного простирания, который прослеживается и далее за пределы участка. Пермские вулканиты имеют тектонические контакты с триасовыми отложениями и граничат с ними по разлому северо-восточного направления, интерпретируемому как взброс, по которому вулканиты надвинуты на триасовые терригенные образования. Плоскость сместителя наклонена на юго-восток под углом 50–70°. Сам разлом представляет собой зону дробления и милонитизации пород как владивостокской свиты так и триасовых отложений с метасотическим и прожилково-жильным окварцеванием. Породы владивостокской свиты разбиты серией более мелких разрывов, параллельных основной зоне разлома, несколько реже его опережающими. Отмечаются также многочисленные зоны трещиноватости, выявленные на значительном удалении от разлома (до 300 м). Все дизъюнктивные зоны сопровождаются кремнекислотным метасоматозом, проявившемся в окварцевании, сульфидизации и лимонитизации (зоны метасоматически измененных пород).

Рудная минерализация приурочена к северо-западному краю блока вулканитов и ограничивающему его взбросу. Триасовые отложения затронуты вторичными изменениями лишь на небольших

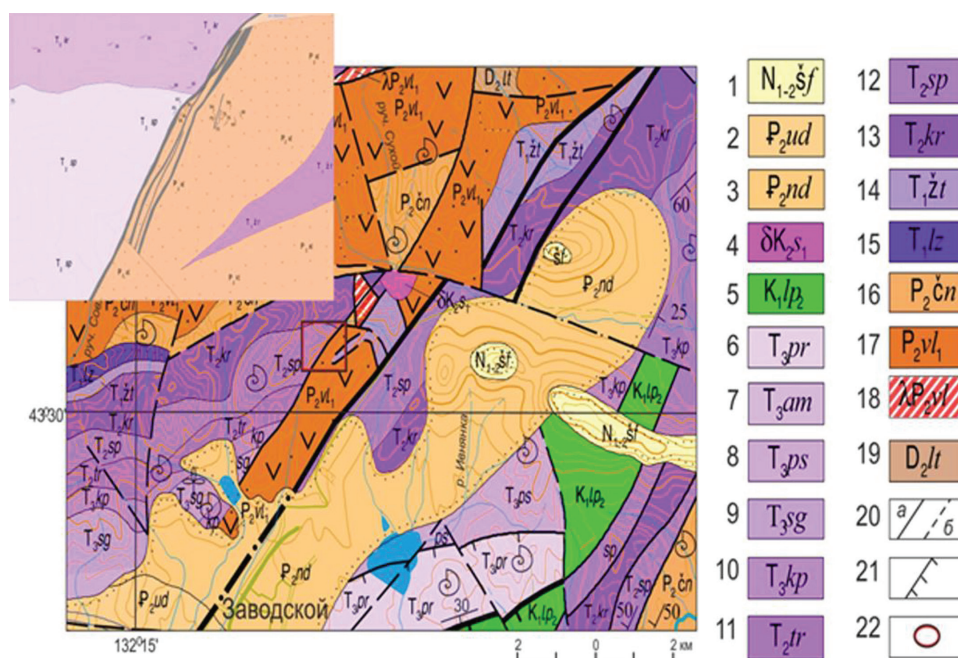


Рис. 1. Фрагмент геологической карты К-53-I (Геологическая..., 1957) и местоположение месторождения Сухое. 1 – базальты, туфы, галечники, пески, глины шуфанской свиты; 2 – гравийники, алевролиты, песчаники, туфо-алевролиты, галечники, туффиты, туфы, глины, бурые угли устьявыдовской свиты; 3 – аргиллиты, песчаники, туфопесчаники, конгломераты, туфоаргиллиты, туффиты, туфы, глины, бурые угли надеждынской свиты; 4 – гранодиориты Синегорского комплекса; 5 – песчаники, алевролиты, аргиллиты, конгломераты, углистые аргиллиты, пласты каменного угля липовецкой свиты; 6 – песчаники, гравелиты, алевролиты перевознинской свиты; 7 – алевролиты, углисто-глинистые сланцы, песчаники, каменный уголь амбинской свиты; 8 – песчаники, алевролиты, гравелиты песчанкинской свиты; 9 – песчаники, алевролиты, углисто-глинистые сланцы, линзы и прослои конгломератов, пласты каменного угля садгородской свиты; 10 – песчаники, алевролиты, углисто-глинистые сланцы, каменные угли кипарисовской свиты; 11 – песчаники, иногда с углистыми примазками тракторной свиты; 12 – песчаники слюдястые спутниковской свиты; 13 – песчаники, сверху разреза слоистые, иногда слюдястые с шаровой отдельностью каразинской свиты; 14 – аргиллиты, алевро-аргиллиты, алевролиты с редкими прослоями песчаников житковской свиты; 15 – песчаники известковистые, прослои алевролитов, ракушники лазурнинской свиты; 16 – песчаники, алевролиты, туфопесчаники, туфы кислого и среднего состава, конгломераты, линзы известняков чандалазской свиты; 17 – андезиты, их туфы, туффиты, алевролиты, песчаники, туфопесчаники владивостокской свиты; 18 – экструзивные тела этих вулканитов; 19 – песчаники, алевролиты, конгломераты, туфы, сланцы люторгской свиты; 20 – разломы: а – установленные, б – предполагаемые; 21 – надвиги; 22 – рудопроявление Сухое. Врезка: площадь рудолокализации зон прожилково-вкрапленной минерализации.

Fig. 1. Fragment of a geological map K-53-I (Geological map of the USSR 1:200 000) and the location of the Sukhoe deposit. 1 – basalts, tuffs, pebbles, sands, clays of the Shufan formation; 2 – gravels, siltstones, sandstones, tufoalevrolites, pebbles, tuffites, tuffs, clays, brown coals of the Ustavydov formation; 3 – mudstones, sandstones, tuff sandstones, conglomerates, tufoargillites, tuffites, tuffs, clays, brown coals of the Nadezhdinskaya formation; 4 – granodiorites of the Sinegorsky complex; 5 – sandstones, siltstones, mudstones, conglomerates, carbonaceous mudstones, coal beds of the Lipovetsky formation; 6 – sandstones, gravelites, siltstones of the Perevozninsky formation; 7 – siltstones, carbonaceous-clay shales, sandstones, coal of the Ambinsky formation; 8 – sandstones, siltstones, gravelites of the Peschankinsky formation; 9 – sandstones, siltstones, carbonaceous-clay shales, lenses and interlayers of conglomerates, layers of coal of the Sadgorodsky formation; 10 – sandstones, siltstones, carbonaceous-clay shales, coals of the Cypress formation; 11 – sandstones, sometimes with carbonaceous primers of the tractor formation; 12 – micaceous sandstones of the Satellite formation; 13 – sandstones, layered at the top of the section, sometimes micaceous with a spherical separation of the Karazin formation; 14 – mudstones, siltstones, siltstones with rare interlayers of sandstones of the Zhitkov formation; 15 – calcareous sandstones, siltstone interlayers, shell rocks of the Lazurninsky formation; 16 – sandstones, siltstones, tuff sandstones, tuffs of acid and medium composition, conglomerates, lenses of limestone of the Chandalez formation; 17 – andesites, their tuffs, tuffites, siltstones, sandstones, tuff sandstones of the Vladivostok formation; 18 – extrusive bodies of these volcanites; 19 – sandstones, siltstones, conglomerates, tuffs, shales of the Lyutorg formation; 20 – faults: a – established, b – assumed; 21 – thrust; 22 – Dry ore occurrence. Inset: the area of ore rudocalcification of veined-interspersed mineralization zones.

интервалах и в непосредственной близости к разлому. Основные рудные тела – кварц-прожилковые зоны и метасоматиты, пронизанные арсенопирит-полевошпатовыми прожилками, локализованы главным образом, висячем блоке в поле развития вулканитов, туфов и груботерригенных образований владивостокской свиты. Рудные тела преимущественно линзо-пластообразные, мощностью в несколько десятков метров и протяженностью до 800–1000 м. Текстуры руд – вкрапленные, прожилково-вкрапленные, сетчато-прожилковые, полосчатые, брекчиевидные.

К основным жильным минералам относятся кварц, калиевый полевой шпат, карбонаты (кальцит). Количество рудных минералов не превышает 1–2 % жильной массы. Главным рудным минералом является арсенопирит, в подчиненных количествах отмечены пирит и шеелит. Остальные (монацит, галенит, сфалерит, халькопирит, тетраэдрит, акантит, антимонит, бурнонит, редкие земли) обнаруживаются в виде субмикроскопических включений. Выделения свободного золота крайне редки.

Основу руды месторождения составляет кварц. По данным химического анализа количество кремнекислоты колеблется от 50 до 74 мас. %. Значительно меньше Al_2O_3 (от 7.4 до 17.0 мас. %). Невысоки концентрации щелочных элементов: K_2O от 2.0 до 4.4 мас. %, а Na_2O – от 0.1 до 0.5 мас. %. Содержания окиси и закиси железа также сравнительно невелики, соответственно 1.90–3.50 и 1.20–5.10 масс. %.

Элементный состав руд достаточно сложен. Фиксируются повышенные концентрации золота, вольфрама, мышьяка, редкоземельных элементов. Самородное золото, определяющее промышленную ценность месторождения, распределено в рудных телах довольно неравномерно (среднее содержание – 3 г/т, в отдельных случаях до 25–40 г/т). Содержания вольфрама на отдельных участках составляют 750 г/т и выше. Отличительными чертами рудоносных пород являются преобладание легких лантаноидов над тяжелыми, а также европиевый минимум (суммарное содержание редкоземельных элементов достигает 200 г/т).

Арсенопирит развит исключительно в кварц-полевошпатовых прожилках (рис. 2 а, б). В отраженном свете минерал имеет белый цвет, высокую отражательную способность и твердость. Двухотражение наблюдается только по границам зерен. Анизотропия умеренная с цветным эффектом от красновато-коричневого до темно-синего цветов. Химический состав арсенопиритов приведен в таблице 1. В зальбандах этих прожилков встречены единичные выделения сфалерита.

Формы нахождения золота в арсенопирите исследовались с применением рентгеноспектрального электронно-зондового анализа отдельных зерен. Было установлено, что в этом сульфиде отсутствуют включения металла, чей размер был бы сопоставим с диаметром области генерации рентгеновского излучения (0.5 мкм). Тем не менее, арсенопириты (золото присутствует в 30 зернах из 40 изученных) характеризуются довольно высокими концентрациями золота, достигающими в отдельных случаях 4900 г/т (табл. 1).

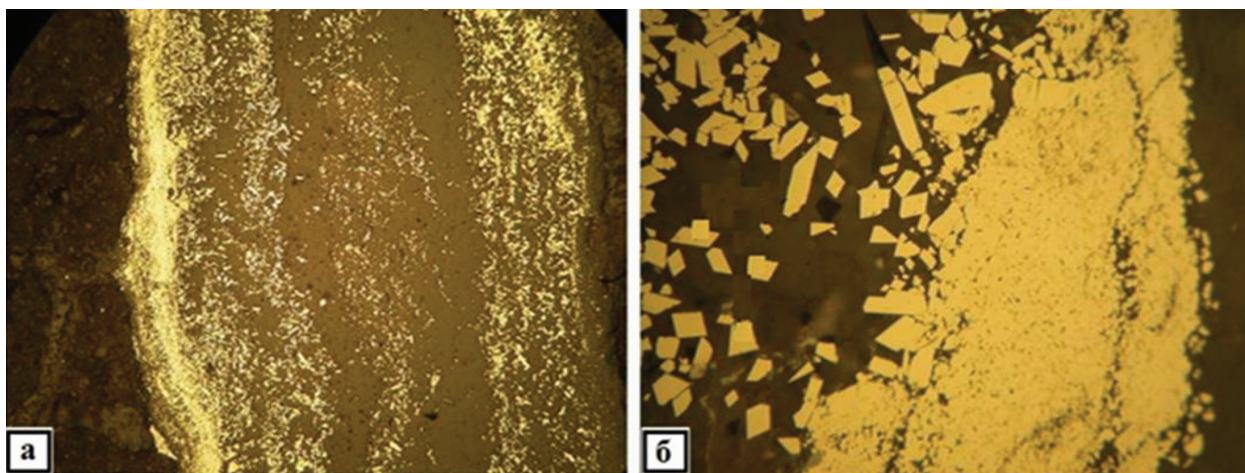


Рис. 2. Характер распределения арсенопирита (а, б) в кварц-полевошпатовых прожилках (белое – арсенопирит).

Fig. 2. Distribution pattern of arsenopyrite (a, b) in quartz-feldspar veins (white – arsenopyrite).

Таблица 1. Состав арсенопиритов месторождения Сухое, ат. %
Table 1. Composition of arsenopyrites of the Sukhoi deposit, at. %

Элемент	Номер образца									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fe	34.53	34.53	34.42	34.49	34.93	34.60	34.63	34.42	34.47	34.79
As	30.45	31.37	31.48	31.85	31.11	31.20	32.18	29.94	31.88	30.89
S	34.37	33.87	33.52	33.29	33.48	33.70	32.87	35.47	33.18	34.07
Au	0.03	0.07	0.14	0.08	0.08	0.15	0.02	0.11	0.01	0.15
S/As	1.13	1.08	1.07	1.08	1.08	1.08	1.02	1.08	1.04	1.11

Примечание. Анализы выполнены на микроанализаторе Jeol Superprobe JXA 8100. Аналитик А.А. Карабцов.

По данным нейтронно-активационного анализа в монофракциях арсенопирита содержания благородного металла варьируют от 51 до 132 г/т, что подтверждает данные о высокой золотоносности арсенопирита, полученные микрорентгеноспектральным анализом. Результаты рентгеновской томографии свидетельствуют о равномерном характере распределения золота в арсенопирите (рис. 3).

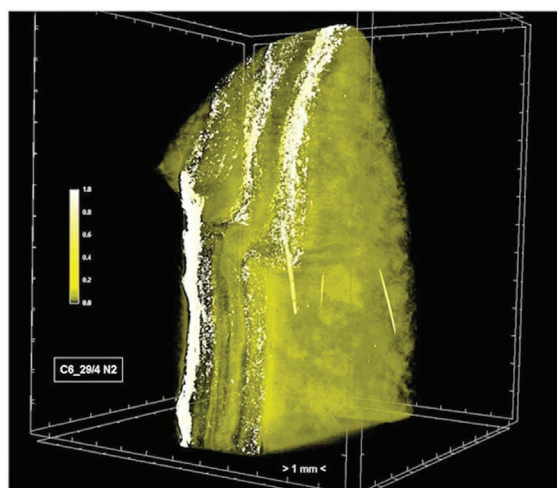


Рис.3. Распределение золота в арсенопиритовом прожилке.

Fig. 3. Distribution of gold in arsenopyrite veinlet.

Данные микрозондовых исследований указывают на нестехиометричность состава изученных арсенопиритов – постоянном преобладании серы над мышьяком (табл. 1). При этом, в минералах с наиболее высокими значениями серно-мышьякового отношения отмечаются максимальные концентрации золота, что наблюдалось и на других месторождениях с «невидимым» золотом (Cabri, L.J. et al., 1989; Волков и др., 2017). Факт согласованного поведения этих элементов подчеркивает высокую вероятность вхождения золота в кристаллическую решетку арсенопирита.

Пирит отмечается в тонких кварц-полевошпат-карбонатных прожилках и жилах, завершающих этап метасоматических преобразований вмещающих пород. Образует сростания идиоморфных кристаллов и ксеноморфных скоплений с халькопиритом и сфалеритом. Пирит имеет светло-желтый цвет, высокую

отражательную способность и микротвердость, изотропный. Химический состав пирита, приведенный в таблице 2, характеризуется достаточно высоким содержанием мышьяка (3.66–4.09 ат. %) и золота (до 5200 г/т). При этом включений благородного металла более 0.5 мкм в сульфиде также не было обнаружено. Анализ полученных данных указывает на отрицательную зависимость между содержаниями Au и Fe, возможно, обусловленную формой нахождения золота в сульфиде. Скорее всего, это твердый раствор, в котором Au замещает Fe в структуре пирита.

Таблица 2. Состав пиритов месторождения Сухое, ат. %
Table 2. Composition of pyrites from the Sukhoi deposit, at. %

Элемент	Номер образца									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fe	31.69	33.42	33.05	34.17	32.19	32.01	29.19	32.15	30.49	30.10
As	0.27	2.34	3.66	4.00	0.89	0.78	0.10	0.33	0.04	0.01
S	67.32	63.90	63.05	61.62	66.63	66.99	70.52	67.39	69.15	69.56
Au	0.13	0.06	0.24	0.12	0.29	0.21	0.18	0.13	0.32	0.14

Примечание. Анализы выполнены на микроанализаторе Jeol Superprobe JXA 8100. Аналитик А.А. Карабцов.

В результате проведенных исследований установлено, что золото присутствует в рудных образованиях месторождения Сухое в «невидимой» форме, концентрируясь в химически связанной форме в арсенопирите и мышьяковистом пирите. Совместная кристаллизация этих сульфидов и основной массы золота рассматриваемого объекта свидетельствует о возможности транспортировки металла в виде комплексных соединений, координированных через серу (Сорокин, 1973; Simon et al., 1999).

В последнее время выяснено (Волков и др., 2007; Ковальчук и др., 2017; Сидорова и др., 2020), что «невидимое» золото в прожилково-вкрапленных рудах месторождений Урала (Воронцовского), Енисейского кряжа (Олимпиаденского, Ведуги), Северо-Востока (Неждановского, Наталкинского, Майского, Павлика и др.), Казахстана (Бакырчика, Суздальского, Большевика), также концентрируется, главным образом, в сульфидах – пирите и арсенопирите. При этом значение $\delta^{34}\text{S}$ сульфидных минералов варьирует от -5 до 2‰ (с преобладанием отрицательных характеристик), позволяя предполагать о мантийно-коровой природе вещества (Волков и др., 2017).

Для оценки источников рудного вещества изучен изотопный состав серы золотосодержащих арсенопиритов месторождения Сухое. Было установлено, что изотопные характеристики этих сульфидов обладают довольно высокой степенью гомогенности, укладываясь в узкий интервал значений $\delta^{34}\text{S}$ от 3.2 до 5.9 ‰, отвечающий гранитоидам магнетитовой серии (Ishihara et al., 1989). Утяжеленный изотопный состав серы сульфидов заметно отличает изученный объект от известных месторождений подобного типа других регионов. Наиболее вероятным источником рудоносных флюидов в нашем случае, была интрузия гранитоидов, закартированная на северо-восточном фланге изученной площади (рис. 1). Вопросы фракционирования золота при дифференциации гранитоидных магм рассмотрены достаточно подробно. Теоритически и экспериментально подтверждено, что поведение металла в изверженных процессах контролировалось сульфидными минералами (Simon et al., 2000). В конечном итоге эти представления нашли свое подтверждение в формировании золото – сульфидной минерализации месторождения Сухое.

Заключение

Выполненные исследования показывают, что практически вся масса золота месторождения Сухое связана с сульфидами – арсенопиритом и мышьяковистым пиритом. При этом источником рудного вещества послужили гранитоиды магнетитовой серии. Для выяснения геодинамического режима формирования этого нового для региона типа золоторудной минерализации необходимо проведение дополнительных исследований, включающих изотопно-геохимические и изотопно-геохронологические методы изучения гранитоидов, к которым пространственно тяготеют рассматриваемые минерализованные зоны. Учет опыта отечественного и зарубежного технологического передела подобных золото-сульфидных руд в сочетании с полученной минералого-геохимической информацией позволят более обоснованно наметить пути освоения изученного объекта.

Работа выполнена в рамках государственной бюджетной темы: «Месторождения стратегических металлов Тихоокеанской России, обстановки формирования и прогноз их новых и нетрадиционных типов» № 0270-2016-0003.

Литература

1. Волков А.В., Генкин А. Д., Гончаров В.И. О формах нахождения золота в рудах месторождений Наталкинского и Майского (Северо-Восток России) // Тихоокеанская геология. 2007. Т. 25. № 6. С. 17–29.
2. Волков А.В. Сидоров А.А. Невидимое золото // Вестник РАН. 2017. Т. 87. № 1. С. 40–49. DOI:10.7868/S0869587317010121.
3. Геологическая карта СССР 1:200 000. Серия Сихотэ-Алинская. Лист К-53-I / ред. Верещагин В.Н. М.: Госгеолтехиздат, 1957.
4. Ковальчук Е.В., Тагиров Б.Р., Викентьев И.В. и др. «Невидимое» золото в синтетических и природных кристаллах арсенопирита (Воронцовское месторождение, Северный Урал) // ГРМ. 2019. Т. 461. № 5. С. 62–63. DOI: 10.31857/S0016-777061562-83.
5. Моисеенко В.Г. Геохимия и минералогия золота рудных районов Дальнего Востока. М.: Наука, 1977. 304 с.

6. Моисеенко В.Г. От атомов золота через кластеры, нано-и микроскопические частицы до самородков благородного металла. Благовещенск: ДВО РАН. Амурское отделение РМО. 2007. 187 с.
7. Молчанов В.П., Андросов Д.В., Карабцов А.А. «Невидимое» золото в рудах месторождения Сухое (Приморье) // Вопросы геологии и комплексного изучения экосистем Восточной Азии. Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2022. С. 56–57.
8. Сидорова Н.В., Аристов В.В., Григорьева А.В. «Невидимое» золото в пирите и арсенопирите месторождения Павлик (Северо-Восток России) // Доклады РАН. 2020. Т. 495. № 1. С. 26–31. DOI: 10.31857/S2686739720110134.
9. Сорокин В.Н. Об одной из возможной форм переноса золота в гидротермальных растворах // Геохимия. 1973. № 12. С. 1892–1894.
10. Cabri L.J., Chryssoulis S.L., de Villiers J.P.R., Laflamme J.H.G. and Buseck P.R. The nature of “invisible” gold in arsenopyrite // *Canad. Miner.* 1989. V. 27. P. 353–362.
11. Cabri L.J., Newville M., Gordon R.A., Daryl Crozier E., Sutton S.R., McMahon G. and Jiang D.T. Chemical speciation of gold in arsenopyrite // *Canad. Miner.* 2000. V. 38. P. 1265–1281.
12. Genkin A.D., Bortnikov N.S., Cabri L.J., Wagner F.E., Stanley C.J., Safonov O.G., McMahon G., Friedl J., Kerzin, A.L. and Gamyanin, G.N. A multidisciplinary study of invisible gold in arsenopyrite from four mesothermal gold deposits in Siberia, Russian federation // *Econ. Geol.* 1998. V. 93. P. 463–487.
13. Ivannikov S.I., Markin N.S., Zheleznov V.V. Nuclear Technology and Radiation Protection. 2021. P. 5. DOI: 10.2298/NTRP201217005I.
14. Ishihara S, Sasaki A. Sulfur isotopic ratios of the magnetite-series and ilmenite-series granitoids of the Sierra Nevada batholith - a reconnaissance study // *Geology*. 1989. V. 17 (9). P. 788–791. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017).
15. Simon G., Kesler S.E., Chryssoulis S.L. Geochemistry and Textures of Gold-bearing Arsenian Pyrite, Twin Creeks, Nevada: Implications for Deposition of Gold in Carlin-type Deposits // *Econ. Geol.* 1999. V. 94. P. 405–421.
16. Simon G., Kesler S.E., Essene E.J. Gold in porphyry copper deposits: experimental determination of the distribution of gold in the Cu-Fe-S system at 400 to 700 °C // *Econ. Geology*. 2000. V. 95. P. 259–270.