

Научная статья

УДК 550.4:553+553.41

DOI: 10.37102/0869-7698\_2023\_230\_04\_6

EDN: ILLCWU

## «Невидимое» золото минерализованных зон Южного Приморья (рудопроявление Сухое)

В.П. Молчанов✉, И.В. Кемкин, Д.В. Андросов, В.В. Яковенко

*Владимир Петрович Молчанов*

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник  
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия  
vpmol@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7206-356X>

*Игорь Владимирович Кемкин*

член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор  
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия  
kemkin@fegi.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9105-288X>

*Дмитрий Владимирович Андросов*

кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник  
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия  
androsov64@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-7517-0624>

*Виктория Васильевна Яковенко*

кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник  
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия  
yakovenko\_v.v@mail.ru  
<http://orcid.org/0000-0003-3834-3626>

**Аннотация.** На юге Дальнего Востока России выявлен новый перспективный тип источников полезных ископаемых – зоны прожилково-вкрапленной минерализации, где золото находится в рассеянной форме. Определены основные черты минералогии и геохимии рудных образований. Выяснено, что золото присутствует в «невидимой» форме, концентрируясь преимущественно в арсенопирите и мышьяковистом пирите. Для реконструкции условий формирования руд изучен изотопный состав серы этих сульфидов. Полученные данные открывают новые возможности для переоценки перспектив сырьевой базы благородных металлов Приморья.

**Ключевые слова:** «невидимое» золото, арсенопирит, пирит, минералогия, изотопия, геохимия, рудопроявление Сухое, Южное Приморье.

**Для цитирования:** Молчанов В.П., Кемкин И.В., Андросов Д.В., Яковенко В.В. «Невидимое» золото минерализованных зон Южного Приморья (рудопоявление Сухое) // Вестн. ДВО РАН. 2023. № 4. С. 82–91. [http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698\\_2023\\_230\\_04\\_6](http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_230_04_6).

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках Государственного задания ДВГИ ДВО РАН, номер гос. регистрации 122040800199-8.

Original article

## “Invisible” gold of mineralized zones of Southern Primorye (the ore occurrence Sukhoe)

V.P. Molchanov, I.V. Kemkin, D.V. Androsov, V.V. Yakovenko

*Vladimir P. Molchanov*

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher  
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
vpmol@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7206-356X>

*Igor V. Kemkin*

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy, Professor, Member-Correspondent of the  
RAS  
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
kemkin@fegi.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9105-288X>

*Dmitry V. Androsov*

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy, Leading Researcher  
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
androsov64@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-7517-0624>

*Victoria V. Yakovenko*

Candidate of Sciences in Geology and Mineralogy  
Senior Researcher  
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
yakovenko\_v.v@mail.ru  
<http://orcid.org/0000-0003-3834-3626>

**Abstract.** In the south of the Russian Far East, a new promising type of mineral sources has been identified – zones of streaked-interspersed mineralization, where the gold is in a dispersed form. The main features of mineralogy and geochemistry of ore formations are determined. It was found out that gold is presented in an “invisible” form, concentrating mainly in arsenopyrite and arsenic pyrite. To reconstruct the conditions of ore formation, the isotopic composition of sulfur of these sulfides was studied. The obtained data open up new opportunities for reevaluation of the prospects of the raw material base of precious metals of Primorye.

**Keywords:** “invisible” gold, arsenopyrite, pyrite, mineralogy, isotopy, geochemistry, ore occurrence Sukhoe, Southern Primorye

**For citation:** Molchanov V.P., Kemkin I.V., Androsov D.V., Yakovenko V.V. “Invisible” gold of mineralized zones of Southern Primorye (the ore occurrence Sukhoe). *Vestnik of the FEB RAS*. 2023;(4):82-91. (In Russ.). [http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698\\_2023\\_230\\_04\\_6](http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_230_04_6).

**Funding.** The work was carried out within the framework of the State task of the Far East Geological Institute of the Far Eastern Branch of the RAS, state registration number 122040800199-8.

## Введение

Месторождения коренного и россыпного золота в пределах Южного Приморья распространены достаточно широко, и большая часть их практически отработана [1]. В связи с этим возрастает актуальность изучения выявленных еще в 60–70-х годах прошлого века рудопоявлений и пунктов минерализации, признанных по тем временам малоперспективными. Одним из таких объектов является рудопоявление Сухое, в рудных образованиях которого, при непосредственном участии авторов, установлено, что золото присутствует в «невидимой» форме, не выявляемой оптической или сканирующей электронной микроскопией [2]. В.Г. Моисеенко использовал термин «нанозолото», к которому отнес частицы (но не группы атомов) размером от 0,6 до 250 нм [3]. Таким образом, понятие «невидимое» золото подразумевает наноразмерные включения металла, его изоморфные примеси в сульфидных минералах или соединения с полуметаллами (Ag, Sb, Bi, Te) [4–7].

В последнее время выяснено [8–10], что «невидимое» золото в прожилково-вкрапленных рудах, например месторождений Урала (Воронцовского), Енисейского кряжа (Олимпиаденского, Ведуги), Северо-Востока (Нежданинского, Наталкинского, Майского, Павлика и др.), Казахстана (Бакырчика, Суздальского, Большевика) и т.д., концентрируется главным образом в сульфидах – пирите и арсенипирите. 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 проявления Сухое послужила весомым основанием для проведения наших исследований.

## Методы исследований

Для решения поставленных задач потребовалось выполнить комплекс минералого-геохимических и изотопно-геохимических исследований. Анализ микроэлементного состава проб был выполнен на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) Agilent 7500c (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 зёрнами. Полученные искусственные монтировки предварительно изучались в отраженном свете оптического микроскопа. Далее на поверхности образцов в вакууме на установке CC 7650 (Quatum Technologies Ltd., Великобритания) напыляли проводящий слой углерода толщиной до 20 нм для последующих аналитических исследований.

Определение содержания 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 [11].

Изотопный анализ серы сульфидов выполнен после соответствующей пробоподготовки мономинеральных проб. Изотопные соотношения серы измеряли на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (ThermoFinnigan, Bremen, Germany) с использованием двойной системы напуска. Определения изотопного состава приведены относительно лабораторного рабочего стандарта, откалиброванного с использованием международных стандартов IAEA-S-1, IAEA-S-2, IAEA-S-3 и NBS-123. Погрешность определения  $\delta^{34}\text{S}$  составляла  $\pm 0,1\%$ .

### **Объект исследований**

Рудопроявление Сухое расположено на юге Приморья в 5 км на северо-восток от пос. Заводской, административно входящего в Артемовский городской округ (рис. 1). В соответствии с 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, песчаных алевролитов, алевро-песчаников 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 пределами 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 метасоматическим 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, проявившимся 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 интервалах и в непосредственной близости к разлому. Основные рудные тела – кварц-прожилковые зоны и метасоматиты, пронизанные арсенопирит-полевошпатовыми прожилками (рис. 2), локализованы главным образом в висячем блоке в поле развития вулканитов, туфов и

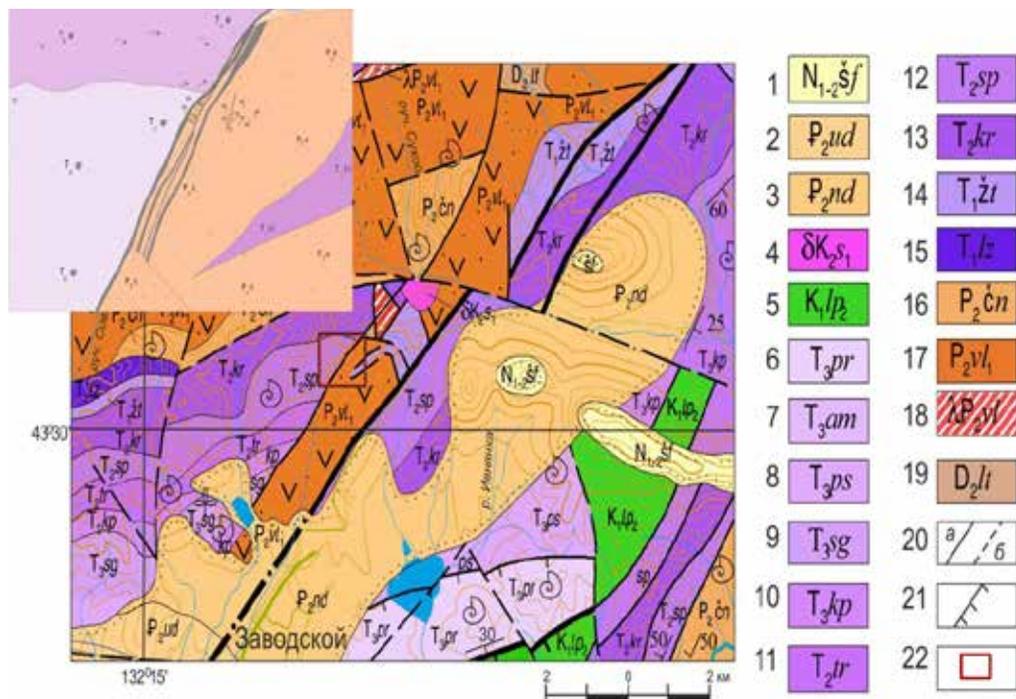


Рис. 1. Фрагмент геологической карты К-53-1 [17] и местоположение рудопроявления Сухое. 1 – базальты, туфы, галечники, пески, глины шуфанской свиты; 2 – гравийники, алевролиты, песчаники, туфоалевролиты, галечники, туффиты, туфы, глины, бурые угли усть-давыдовской свиты; 3 – аргиллиты, песчаники, туфопесчаники, конгломераты, туфоаргиллиты, туффиты, туфы, глины, бурые угли надеждинской 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,верху 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, ракушняки 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 – экстррузивные тела 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

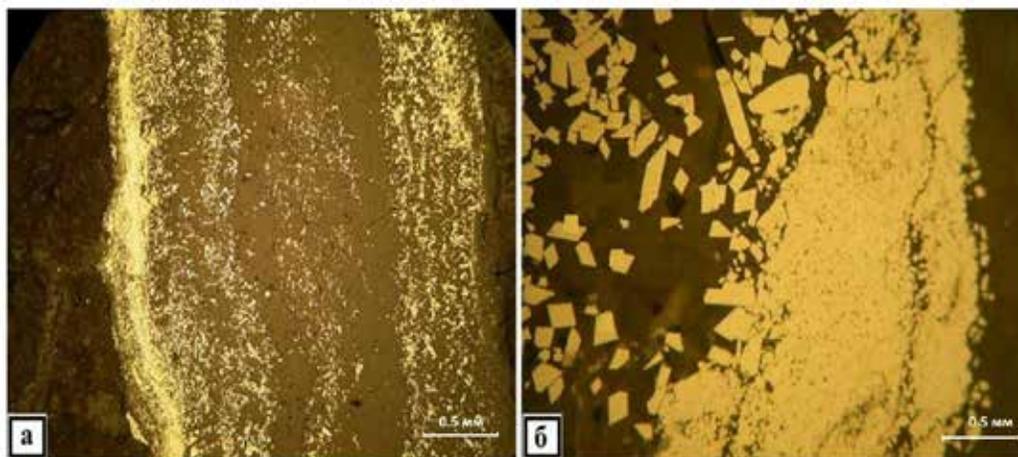


Рис. 2. Характер распределения арсенопирита (*a*, *б*) в кварц-полевошпатовых прожилках (светлое – арсенопирит)

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.

В металлоносных образованиях рудопроявления установлен широкий спектр элементов от петрогенных вплоть до Au, W, As и редких земель. Вещественному составу руды присуще преобладание  $\text{SiO}_2$  (от 50 до 74 масс.%), значительно меньше  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (от 7,4 до 17,0 масс.%). Невысоки концентрации щелочных элементов:  $\text{K}_2\text{O}$  – от 2,0 до 4,4, а  $\text{Na}_2\text{O}$  – от 0,1 до 0,5 масс.%. Содержания окиси и закиси железа также сравнительно невелики, соответственно 1,90–3,50 и 1,20–5,10 масс.%. 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).

К основным жильным минералам относятся кварц, калиевый полево 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.

## Результаты исследований и их обсуждение

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.

Тем не менее арсенопириты (металл присутствует в 30 зернах из 40 изученных) характеризуются довольно высокими концентрациями золота, достигающими в отдельных случаях 4900 г/т (табл. 1).

Таблица 1

Состав арсенопиритов рудопроявления Сухое, ат. %

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 микрорентгено-спектральным анализом. Результаты рентгеновской томографии свидетельствуют о равномерном характере распределения золота в арсенопирите (рис. 3).

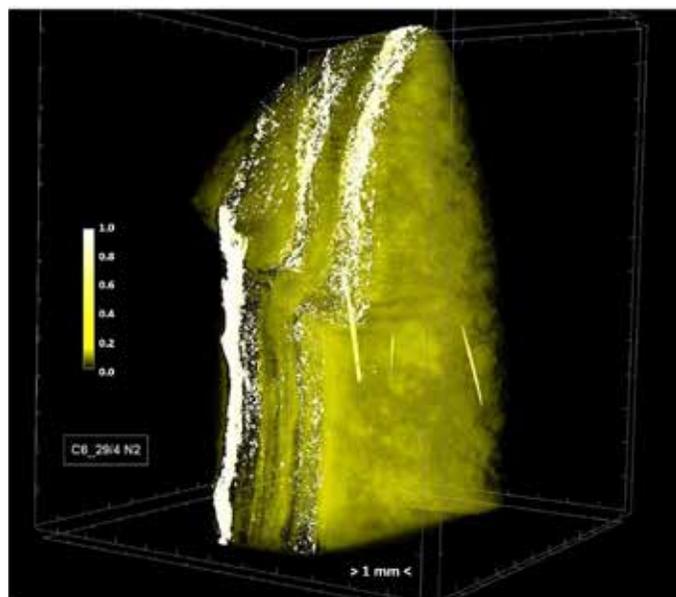


Рис. 3. Распределение золота в арсенопиритовом прожилке

Данные микрорентгено-спектральных исследований указывают на нестехиометричность состава изученных арсенопиритов – постоянное преобладание 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 [5, 12]. Этот факт согласованного поведения содержаний золота, мышьяка и серы

подчеркивает высокую вероятность их совместной транспортировки рудоносными флюидами.

Для подтверждения этого вывода были проведены микрорентгено-спектральные исследования зерен пирита (25 образцов), установившие достаточно высокие содержания мышьяка (до 3,66–4,00 ат.%) и золота (до 5200 г/т) (табл. 2). При этом включений благородного металла более 0,5 мкм в сульфиде также не было обнаружено. Полученные данные указывают 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 рудопоявления Сухое, ат.%

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.

Таким образом, в результате проведенных исследований выяснено, что золото присутствует в рудных образованиях рудопоявления Сухое в невидимой форме, концентрируясь преимущественно 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 [13, 14].

Для оценки источников рудного вещества изучен изотопный состав серы золотосодержащих арсенопиритов. 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 магматическому (гранитоидному) источнику рудного вещества [15]. Утяжеленный изотопный состав серы сульфидов заметно отличает изученный объект от известных месторождений подобного типа других регионов [12], где значение  $\delta^{34}\text{S}$  сульфидных минералов варьирует от -5 до 2 ‰ (с преобладанием отрицательных характеристик), позволяя предполагать о мантийно-коровой природе вещества. 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. Теоретически и экспериментально подтверждено, что поведение металла в изверженных процессах контролировалось сульфидными минералами [16]. В конечном итоге эти представления нашли свое подтверждение в формировании золотосульфидной минерализации рудопоявления Сухое.

## Заключение

Выполненные исследования показывают, что практически вся масса золота рудопоявления Сухое связана с сульфидами – арсенопиритом и мышьяковистым пиритом. Для выяснения геодинамического режима формирования этого нового для региона типа золоторудной минерализации необходимо проведение дополнительных исследований, включающих изотопно-геохимические и изотопно-геохронологические изучения гранитоидов, к которым пространственно тяготеют рассматриваемые минерализованные зоны. Учет опыта отечественного

и зарубежного технологического передела подобных золотосульфидных руд в сочетании с полученной минералого-геохимической информацией позволит более обоснованно наметить пути освоения рудопроявления Сухое.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Моисеенко В.Г. Геохимия и минералогия золота рудных районов Дальнего Востока. М.: Наука, 1977. 304 с.
2. Молчанов В.П., Андросов Д.В., Карабцов А.А. «Невидимое» золото в рудах месторождения Сухое (Приморье) // Вопросы геологии и комплексного изучения экосистем Восточной Азии: сб. докл. 6-й Всерос. науч. конф. Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2022. С. 56–57. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49941491> (дата обращения: 17.05.2023).
3. Моисеенко В.Г. От атомов золота через кластеры, нано- и микроскопические частицы до самородков благородного металла. Благовещенск: ДВО РАН. Амур. отд-ние РМО, 2007. 187 с.
4. Петровская Н.В. Самородное золото. М.: Наука, 1973. 350 с.
5. Cabri L.J., Chrystoullis S.L., de Villiers J.P.R., Laflamme J.H.G., Buseck P.R. The nature of “invisible” gold in arsenopyrite // *Canad. Miner.* 1989. Vol. 27. P. 353–362.
6. Cabri L.J., Newville M., Gordon R.A., Daryl Crozier E., Sutton S.R., McMahon G., Jiang D.-T. Chemical speciation of gold in arsenopyrite // *Canad. Miner.* 2000. Vol. 38. P. 1265–1281.
7. 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., Gamyarin G.N. A multidisciplinary study of invisible gold in arsenopyrite from four mesothermal gold deposits in Siberia, Russian Federation // *Econ. Geol.* 1998. Vol. 93. P. 463–487.
8. Волков А.В., Генкин А.Д., Гончаров В.И. О формах нахождения золота в рудах месторождений Наталкинское и Майское (Северо-Восток России) // *Тихоокеан. геология.* 2006. Т. 25, № 6. С. 18–29.
9. Ковальчук Е.В., Тагиров Б.Р., Викентьев И.В. и др. «Невидимое» золото в синтетических и природных кристаллах арсенопирита (Воронцовское месторождение, Северный Урал) // *Геология рудных месторождений.* 2019. Т. 61, № 5. С. 62–83. DOI: 10.31857/S0016-777061562-83.
10. Сидорова Н.В., Аристов В.В., Григорьева А.В., Сидоров А.А. «Невидимое» золото в пирите и арсенопирите месторождения Павлик (Северо-Восток России) // *Докл. РАН. Науки о Земле.* 2020. Т. 495, № 1. С. 26–31. DOI: 10.31857/S2686739720110134.
11. Ivannikov S.I., Markin N.S., Zhelezov V.V. Determination of uranium in solutions by the neutron activation analysis method with <sup>252</sup>Cf radionuclide neutron source // *Nuclear Technology and Radiation Protection.* 2021. Vol. 36, N 1. P. 12–17. DOI: 10.2298/NTRP201217005I.
12. Волков А.В., Сидоров А.А. Невидимое золото // *Вестн. РАН.* 2017. Т. 87, № 1. С. 40–49. DOI: 10.7868/S0869587317010121.
13. Сорокин В.Н. Об одной из возможных форм переноса золота в гидротермальных растворах // *Геохимия.* 1973. № 12. С. 1892–1894.
14. Simon G., Kesler S.E., Chrystoullis 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. Vol. 94. P. 405–421.
15. Rollinson H.R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Group UK Ltd, 1993. 352 p. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-using-geochemical-data.pdf> (дата обращения: 17.05.2023).
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. Geol.* 2000. Vol. 95. P. 259–270. URL: <https://pubs.geoscienceworld.org/economicgeology/issue/95/2> (дата обращения: 17.05.2023).
17. Геологическая карта СССР 1:200000. Серия Сихотэ-Алинская. Лист К-53-I / ред. В.Н. Верещагин М.: Госгеолтехиздат, 1957.

#### REFERENCES

1. Moiseenko V.G. Geohimiya i mineralogiya zolota rudnyh raionov Dal'nego Vostoka. Moscow: Nauka; 1977. 304 s. (In Russ.).

2. Molchanov V.P., Androsov D.V., Karabcov A.A. «Nevidimoe» zoloto v rudah mestorozhdeniya Suhoe (Primor'e). In: *Voprosy geologii i kompleksnogo izucheniya ekosistem Vostochnoj Azii*: tez. dokl. 6<sup>th</sup> Mezhdunar. nauch. konf. Blagoveshchensk: Institute of Geology and Natural Management FEB RAS; 2022. S. 56-57. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49941491> [cited 17.05.2023].

3. Moiseenko V.G. Ot atomov zolota cherez klastery, nano- i mikroskopicheskie chastitsy do samorodkov blagorodnogo metalla = [From gold atoms through clusters, nano- and microscopic particles to precious metal nuggets]. Blagoveshchensk: FEB RAS. Amur branch of the Russian Mineralogical Society; 2007. 187 s. (In Russ.).

4. Petrovskaya N.V. Samorodnoe zoloto. Moscow: Nauka; 1973. 350 s. (In Russ.).

5. Cabri L.J., Chryssoulis S.L., de Villiers J.P.R., Laflamme J.H.G., Buseck P.R. The nature of "invisible" gold in arsenopyrite. *Canad. Miner.* 1989;27:353-362.

6. Cabri L.J., Newville M., Gordon R.A., Daryl Crozier E., Sutton S.R., McMahon G., Jiang D.-T. Chemical speciation of gold in arsenopyrite. *Canad. Miner.* 2000;38:1265-1281.

7. 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., Gamyarin G.N. A multidisciplinary study of invisible gold in arsenopyrite from four mesothermal gold deposits in Siberia, Russian Federation. *Econ. Geol.* 1998;93:463-487.

8. Volkov A.V., Genkin A. D., Goncharov V.I. O formah nahozhdeniya zolota v rudah mestorozhdenii Natalkinskoe i Maiskoe (Severo-Vostok Rossii). *Tihookeanskaya geologiya.* 2006;25(6):18-29. (In Russ.).

9. Koval'chuk E.V., Tagirov B.R., Vikent'ev I.V. et al. «Nevidimoe» zoloto v sinteticheskikh i prirodnykh kristallakh arsenopirita (Voroncovskoe mestorozhdenie, Severnyi Ural). *Geologiya rudnykh mestorozhdenii.* 2019;61(5):62-83. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0016-777061562-83.

10. Sidorova N.V., Aristov V.V., Grigor'eva A.V., Sidorov A.A. «Nevidimoe» zoloto v pirite i arsenopirite mestorozhdeniya Pavlik (Severo-Vostok Rossii). *Doklady Rossijskoi Akademii nauk. Nauki o Zemle.* 2020;495(1):26-31. DOI: 10.31857/S2686739720110134. (In Russ.).

11. Ivannikov S.I., Markin N.S., Zhelezov V.V. Determination of uranium in solutions by the neutron activation analysis method with <sup>252</sup>Cf radionuclide neutron source. *Nuclear Technology and Radiation Protection.* 2021;36(1):12-17 DOI: 10.2298/NTRP2012170051.

12. Volkov A.V., Sidorov A.A. Nevidimoe zoloto. *Vestnik Rossijskoi Akademii Nauk.* 2017;87(1):40-49. DOI: 10.7868/S0869587317010121. (In Russ.).

13. Sorokin V.N. Ob odnoi iz vozmozhnoj form perenosa zolota v gidrotermal'nykh rastvorah. *Geohimiya.* 1973;(12):1892-1894. (In Russ.).

14. 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;94:405-421.

15. Rollinson H.R. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Group UK Ltd; 1993. 352 p. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-using-geochemical-data.pdf> [cited 17.05.2023].

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. Geol.* 2000;95:259-270. URL: <https://pubs.geoscienceworld.org/economicgeology/issue/95/2> [cited 17.05.2023].

17. Geologicheskaya karta SSSR. 1 : 200 000. Ser. Sihote-Alinskaya. List K-53-I. Ed. V.N. Vereshchagin. Moscow: Gosgeoltekhizdat; 1957. (In Russ.).

