

тонкодисперсными включениями бурнонита CuPbSbS_3 , поскольку последний является характерным и распространенным минералом гумбеитов, и его наличие могло способствовать осаждению субмикроскопического самородного золота.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ, полевые работы – программы Президиума РАН № 19.

Литература

Грабежнев А. И. Метасоматизм, рудообразование и гранитный магматизм. М.: Наука, 1981. 292 с.

Куруленко Р. С. История формирования Шарташского гранитного массива // Ежегодник–1976. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1977. С. 39–41.

Метасоматизм и метасоматические породы / Под ред. В. А. Жарикова и В. Л. Русинова. М.: Научный мир, 1998. 492 с.

Прибавкин С. В., Вотяков С. Л. Амазонитсодержащие пегматиты Шарташского массива (Средний Урал): минералогия, петрогенезис // Записки ВМО. 2004. № 4. С. 10–20.

Середкин М. В. Метасоматиты гумбеитовой формации Гумбейского рудного поля и Шарташского массива, Урал // Петрология. 2000. Т. 8. № 3. С. 280–308.

Сидорова Н. В., Абрамова В. Д. Микропримеси в галениите сульфидно-кварцевых жил золотоносных метасоматитов Березовского месторождения, Средний Урал // Металлогения древних и современных океанов–2018. Вулканизм и рудообразование. Миасс: ИМин УрО РАН, 2018. С. 154–158.

Спиридонов Э. М., Бакиев И. А., Середкин М. В., Куруленко Р. С., Прокофьев В. Ю., Устинов В. И., Прибавкин С. В., Филимонов С. В. Гумбеитовая формация Урала. М.: МГУ, 1997. 100 с.

Ферштатер Г. Б., Холоднов В. В., Кременецкий А. А., Краснобаев А. А., Бородин Н. С., Зинькова Е. А., Прибавкин С. В. Золотоносные габбро-тоналит-гранодиорит-гранитные массивы Урала: возраст, геохимия, особенности магматической и рудной эволюции // Геология рудных месторождений. 2010. Т. 52. № 1. С. 65–84.

Vikent'eva O. V., Bortnikov N. S., Vikentyev I. V., Groznova E. O., Lyubimtseva N. G., Murzin V. V. The Berezovsk giant intrusion-related gold-quartz deposit, Urals, Russia: Evidence for multiple magmatic and metamorphic fluid reservoirs // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 91. P. 837–863.

Е. В. Ковальчук¹, Е. Э. Тюкова^{1,2}, И. В. Викентьев¹, Б. Р. Тагиров¹

¹ – *Институт геологии рудных месторождений, минералогии, петрографии и геохимии РАН, г. Москва*
² – *Научный геоинформационный центр РАН, г. Москва*
elena7kovalchuk@gmail.com

«Невидимое» золото в синтетических и природных кристаллах арсенопирита (Воронцовское месторождение, Северный Урал)

В рудах гидротермальных месторождений золото часто рассеяно в «невидимой» форме в наиболее распространенных минералах системы Fe–As–S, таких как мышьяковистый пирит, арсенопирит, леллингит и пирротин. Предполагается, что форма нахождения «невидимого» Au может быть неструктурной (наноразмерные включения металла и его соединений) и химически связанной (изоморфный твердый раствор) [Genkin et al., 1998]. Целью работы являлось определение диапазона кон-

центраций «невидимого» Au и формы его нахождения в арсенопирите путем изучения синтетических и природных (Воронцовское месторождение, Северный Урал) кристаллов.

Химический состав арсенопирита изучался методами СЭМ, РСМА и ЛА ИСП МС. В настоящей работе основное внимание уделено анализу данных РСМА. Анализы выполнены на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8200 (JEOL, Япония), оснащенный пятью волновыми и одним энергодисперсионным кристаллами. Основные компоненты арсенопирита (As, Fe, S) определялись при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе на цилиндре Фарадея 20 нА, диаметре пучка 1 мкм. Время экспозиции для As (L α , TAP), Fe (K α , LIF) и S (K α , PETH) составляло 10 с на пике и по 5 с на фоне с обеих сторон. В природных кристаллах арсенопирита помимо макрокомпонентов также измерялись концентрации основных элементов-примесей: Ni (K α , LIF), Zn (K α , LIF), Sb (L α , PET), Co (K α , LIF), Cu (K α , LIF), Ag (L α , PET).

Известно, что измерение содержаний Au методом РСМА возможно с использованием кристалла LIF по линии AuL α и на кристалле PET по линиям AuM α и AuM β . Наши исследования спектров в окружении этих линий показали наличие с коротковолновой стороны у линии AuL α «провала», описанного в работе [Self et al., 1990], а в районе линии M α наличие узкого пика от 3-го порядка линии FeK α и очень широкого пика непонятной природы. В связи с этим нами были подобраны соответствующие точки фона, чтобы нивелировать влияние данных артефактов и наложений, и, исходя из того, что отношение сигнал/фон линий M серии лучше, чем у L, именно линия M α была выбрана нами в качестве аналитической. Для определения Au использовалась специальная прецизионная методика: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток на цилиндре Фарадея 300 нА, диаметр пучка 2–3 мкм, время экспозиции на пике 200 с и по 100 с на фоне с обеих сторон. Все вышеперечисленные условия съемки и правильно подобранные точки фона позволили снизить предел обнаружения для 3 σ доверительного интервала до 45 г/т.

Кристаллы арсенопирита были синтезированы по ампульной методике в эвтектическом расплаве хлоридов щелочных металлов (AlCl $_3$ /KCl, CsCl/NaCl/KCl) при стационарном температурном градиенте при температуре 350–600 °С. В системе присутствовало металлическое Au. Детали метода синтеза приведены в работе [Trigub et al., 2017]. Известно, что состав арсенопирита редко соответствует стехиометрическому Fe[AsS]. Состав синтезированного арсенопирита варьировал следующим образом (ат. %): 30.6–35.2 Fe, 30.6–37.5 As, 29.2–35.5 S. По данным РСМА, содержание Au в арсенопирите варьирует от предела обнаружения до 3 мас. %. По данным ЛА ИСП МС, в образцах с низкими содержаниями Au его концентрация изменяется от 10 до 700 г/т.

Полученные данные сравнивались с теоретическими трендами, показывающими изменение состава арсенопирита при разных формах нахождения Au: изоморфное замещение Fe на Au, металлическое Au и другие. Анализ показал, что необходимо сравнивать не абсолютные значения концентраций, а наклон линий тренда (S) в координатах ат. % Au–ат. % Fe. Это связано с тем, что арсенопирит является нестехиометрическим соединением, состав которого меняется в зависимости от условий синтеза и состава среды (с этим связана зональность кристаллов). Вместе с тем, наклон зависимости содержания примесного компонента от состава арсенопирита определяется только формой нахождения примеси. Путем обработки данных РСМА для синтетических кристаллов установлено наличие сильной обратной корреляционной

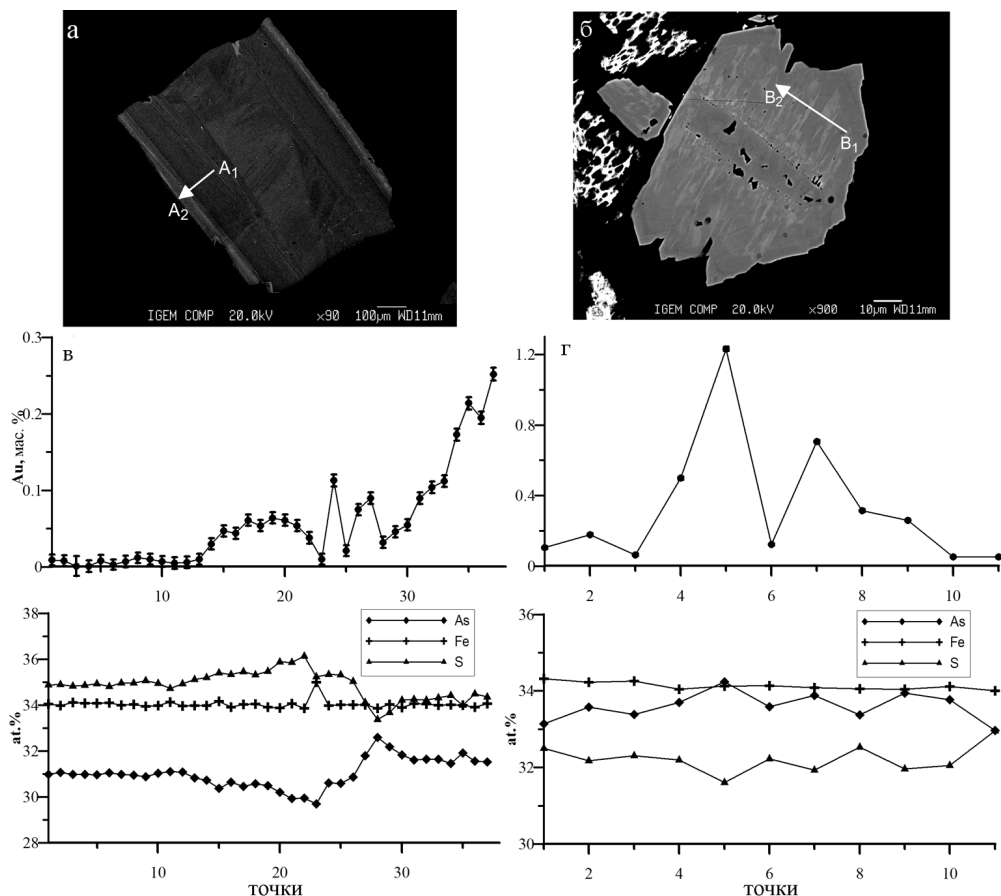


Рис. 1. Кристаллы арсенопирита (Asp) полисульфидно-сульфосольной (а) и золотопирит-реальгаровой (б) ассоциаций и графики распределения Au, As, Fe, S по профилям А₁–А₂ (в) и В₁–В₂ (г).

связи между содержаниями Au и Fe. При этом наклон линий тренда, построенных по результатам усредненных определений составов арсенопирита, близок к теоретической линии изоморфного замещения Fe на Au. Тангенс угла наклона S в координатах ат. % Au–ат. % Fe варьирует от -1.84 до -1.85 при теоретическом наклоне, отвечающем образованию изоморфного твердого раствора -1.89 . Это позволяет предполагать, что в опыте образовывался изоморфный твердый раствор, в котором Au находилось в позиции Fe. Вместе с тем, полученные данные не позволяют однозначно установить, распался ли твердый раствор при закалке, или структурно-химическое состояние Au при охлаждении не изменилось.

Кристаллы природного арсенопирита были отобраны из руд Воронцовского золоторудного месторождения, которое расположено на восточном склоне Северного Урала в вулcano-плутонических породах и является одним из наиболее близких к типу Карлин. В рудах месторождения выделяют четыре группы минеральных ассоциаций,

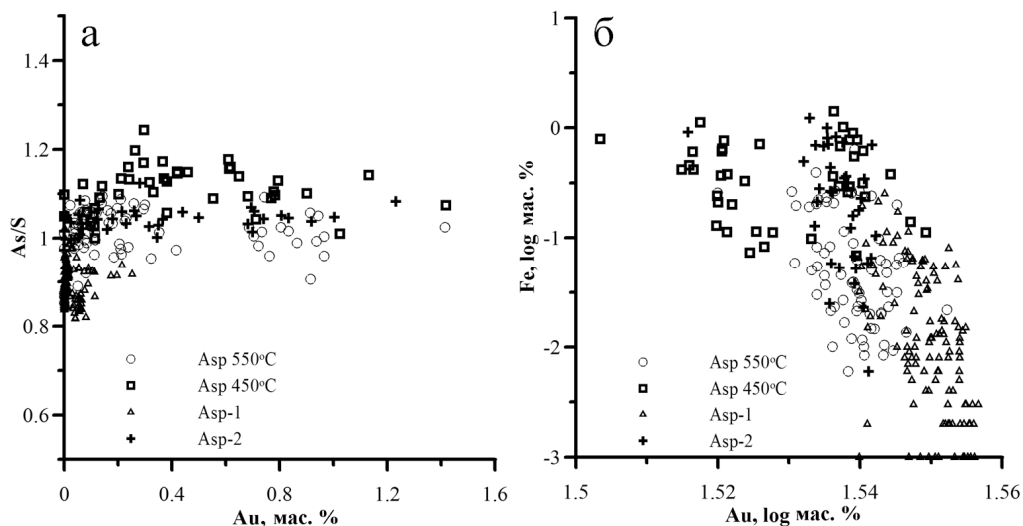


Рис. 2. Соотношения As/S–Au (а) и Au–Fe (б) для синтетического и природного арсенопирита.

развивающихся последовательно и часто накладывающихся одна на другую в различных сочетаниях: колчеданоподобная, золото-пирит-арсенопиритовая, магнетитовые и эпидот-гранатовые скарны и скарноиды, золото-пирит-реальгаровая ассоциация [Викентьев и др., 2016]. В рудах месторождения был изучен арсенопирит полисульфидно-сульфосольной ассоциации из скарновой группы (Asp-1) и арсенопирит наиболее поздней золото-пирит-реальгаровой ассоциации (Asp-2).

Asp-1 в режиме BSE характеризуется зональным строением. Состав его изменяется в области $As/S < 1$ и характеризуется средним соотношением $As/S = 0.89 \pm 0.04$. Содержание Au варьирует от предела обнаружения до 0.25 мас. %. Asp-2 также характеризуется зональным строением, средним соотношением $As/S = 1.04 \pm 0.03$, а содержание Au в нем варьирует от предела обнаружения до 1.23 мас. % (рис. 1). Данные, полученные для природных кристаллов, подтверждают наличие обратной корреляционной связи между содержаниями Au и Fe и прямой – для Au и As. Эти зависимости проявляются в арсенопирите из обеих ассоциаций, несмотря на разницу в абсолютных значениях концентраций. Кроме того, они проявляются не только в пределах одного кристалла, но и, вероятно, на месторождении: более мышьяковистый Asp-2 является более золотоносным.

В целом, все данные показывают слабую положительную корреляцию содержания Au с As/S отношением (рис. 2а) и явно выраженную отрицательную корреляцию с Fe (рис. 2б). Более высокие содержания Au характерны для мышьяковистого и близкого стехиометричному арсенопириту, в то время как в сернистом арсенопирите содержание Au не превышает 0.25 мас. %.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 17-17-01220).

Литература

Викентьев И. В., Тюкова Е. Э., Мурзин В. В., Викентьева О. В., Павлов Л. Г. Воронцовское золоторудное месторождение. Геология, формы золота, генезис. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2016. 204 с.

Genkin A. D., Bortnikov N. S., Safonov Y. G., Kerzin A. L., Cabri L. J., McMahon G., Wagner F. E., Friedl J., Stanley C. J., Gamyagin G. N. A multidisciplinary study of invisible gold in arsenopyrite from four mesothermal gold deposits in Siberia, Russian Federation // *Economic Geology*. 1998. Vol. 93. P. 463–487.

Trigub A. L., Tagirov B. R., Kvashnina K. O., Chareev D. A., Nickolsky M. S., Shiryayev A. A., Baranova N. N., Kovalchuk E. V., Mokhov A. V. X-ray spectroscopy study of the chemical state of “invisible” Au in synthetic minerals in the Fe-As-S system // *American Mineralogist*. 2017. Vol. 102. P. 1057–1065.

Self P. G., Norrish K., Milnes A. R., Graham J., Robinson B. W. Holes in the background in XRS // *X-ray Spectrometry*. 1990. Vol. 19. P. 59–61.

И. В. Викентьев¹, И. Д. Соболев¹, А. В. Травин²

¹ – *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва*
viken@igem.ru

² – *Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск*

Первые результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования серицита из метасоматитов Петропавловского золоторудного месторождения в контексте палеозойской металлогении островодужной системы Полярного Урала

На Полярном Урале известно два золоторудных месторождения (Петропавловское и Новогоднее-Монто), а также множество рудопроявлений с золото-сульфидно-кварцевой, медно-титаномагнетитовой и медно-сульфидной минерализацией, которые связаны с этапом островодужного магматизма. На сегодняшний день остается открытым ряд вопросов, касающихся времени формирования и геодинамической обстановки палеозойских магматических образований и связанной с ними рудной минерализации.

Нами получены новые данные, которые дополняют и уточняют палеотектонические реконструкции, существующие для рудоносных палеозойских комплексов, которые слагают Войкарскую и Щучинскую зоны Полярного Урала. Обоснован средне-позднеордовикский возраст и надсубдукционное происхождение гранитоидов Щучинской зоны (массивы Речной, Яля-Пэ, Нганотский-1), относимых ранее к силурийскому хоймпэйскому и ранне-среднедевонскому юньягинскому комплексам, а также уточнен верхний стратиграфический уровень вмещающих вулканитов сядайсской свиты как средне-позднеордовикский [Соболев и др., 2017]. В Войкарской зоне установлена надсубдукционная природа средне-верхнеордовикских вулканитов устьконгорской свиты [Соболев и др., 2018 и ссылки в ней]. Эти данные свидетельствуют о существовании Полярно-Уральской островодужной системы уже в средне-поздне-