

ПО золота – наиболее представительный ($Au > 0.1$ г/т) выявлен в центральной части рудопроявления; его мощность более 60 м. В пределах последнего, по данным опробования керна скважин, установлены маломощные (до первых десятков метров) ореолы (эпицентры) с наиболее высокими концентрациями золота (более 0.3 г/т). По данным бороздового опробования траншей на дневной поверхности ореол распадается на несколько маломощных (первые метры) зон. Содержания золота в пределах эпицентра в отдельных пробах достигают 6.5 г/т.

Таким образом, по результатам минералого-геохимических и шлихо-минералогических исследований выявлены золотоносные минерализованные зоны рудопроявления Южное, установлены основные закономерности и особенности состава золотоносных образований. Выявлена высокая информативность шлихо-минералогического метода, в частности, изучения электромагнитной и тяжелой немагнитной фракций шлихов.

В ходе исследований установлена высокая значимость и представительность опробования (литохимического по ВОР, шлихового) нижнего информативного малосмещенного слоя элювиально-делювиальных отложений, в рассматриваемом случае на средней глубине 0.8–1.0 м. Это позволяет уже на ранней стадии изучения перспективных площадей и участков определять масштабы золотоносности исследуемого объекта, с высокой точностью устанавливая положение золотоносных минерализованных зон для последующей проходки горных выработок, исключая безрудные интервалы, и минимизировать объемы горно-буровых работ при поисковых исследованиях.

Литература

Иванов А. И. Экспрессный метод поисков золоторудных месторождений в сложных горно-таежных ландшафтах // Руды и металлы. 2014. № 1. С. 36–42.

Мансуров Р. Х., Зеликсон Б. С., Курмаев А. В. Применение экспрессной методики поисков золоторудных месторождений в горно-таежных ландшафтах на примере поисковых работ на большеобъемное золотое оруденение в пределах Средне-Ишимбинской площади // Руды и металлы. 2015. № 4. С. 39–50.

И. Н. Мягкая^{1,2}, Б. Ю. Сарыг-оол¹, Е. В. Лазарева¹, Н. В. Ицук¹, С. М. Жмодик¹
¹ – *Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск*
i_myagkaya@igm.nsc.ru

² – *Томский политехнический университет, г. Томск*

Формы нахождения золота и серебра в рудах Ново-Урского месторождения (Салаирский кряж)

Формы нахождения благородных металлов (БМ) в рудах являются одной из наиболее важных характеристик, определяющих выбор эффективных технологий извлечения полезных компонентов, а также рациональных подходов при поисках. В течение длительного времени существует проблема «невидимого» или «упорного» золота, пути решения которой наметились в последние годы с развитием физических

методов исследования. На основании значительного числа работ о связи Au с сульфидами можно говорить о двух принципиально различных его формах нахождения: структурно-связанной и самородной в виде микро- и наноразмерных частиц с большим числом вариаций между ними [Таусон и др., 2014; Tagirov et al., 2016]. Серебро осаждается в виде собственных сульфидов на поверхности других сульфидов [Mikhlin et al., 2011]. С развитием физических методов анализа «невидимость» БМ сместилась от первых микрометров в область десятков и единиц нанометров. Проблема «невидимого» золота актуальна как для первичных руд, так и для кор выветривания и зон окисления и связана с необходимостью изучения закономерностей миграции и перераспределения элементов в различных геологических процессах [Жмодик и др., 2012].

Объект нашего исследования – Ново-Урское месторождение (п. Урск, Кемеровская область), представленное высокосульфидными Au-содержащими барит-медно-цинковыми первичными рудами и рудами зоны окисления. Главные исследования руд проводились в начале открытия месторождения (1932 г.) [Боглов, 1937]. Ранее была установлена высокая миграционная способность Au и Ag в дренажном растворе из отходов Ново-Урского месторождения и накопление БМ в торфе потока рассеяния в высоких концентрациях [Муагкая et al., 2016; Saryg-ool et al., 2017]. Отсюда вытекает цель данного исследования – установление форм нахождения БМ в рудах. В работе представлены первые результаты исследования, сочетающего эксперименты по подбору методики ступенчатого выщелачивания и минералогические исследования.

На сегодня месторождение отработано, карьер затоплен, но в породных отвалах сохранились образцы первичных и окисленных руд. Были опробованы неокисленные первичные плотные руды; выщелоченные пирит-баритовые породы (пиритовые сыпучки); бурые железняки и окисленные брекчии; углеродистые хлорит-серицитовые сланцы, вмещающие руды. Минеральный состав руд изучен на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA3 LMU (ИГМ СО РАН) в полированных аншлифах и шашках, для последних вещество помещалось на токопроводящий скотч. Химические формы нахождения БМ в рудах изучены методом ступенчатого выщелачивания (навеска 0.5 г). Извлекались семь фракций: водорастворимая ($H_2O_{\text{дист.}}$), ионообменная (1М р-р ацетата аммония, pH = 7), кислоторастворимая (1М р-р ацетата аммония, pH = 5), окисляемая-1 (35 % р-р H_2O_2), восстанавливаемая (2М р-р гидроксиламина гидрохлорида в 25 % уксусной кислоте, pH = 2), окисляемая-2 (смесь, состоящая из 20 % HNO_3 и 20 % H_2O_2), остаточная (смесь минеральных кислот). Содержания БМ в рудах и аликвотах определены ААС методом на приборе Solar M6 (ИГМ СО РАН).

Содержания БМ в образцах значительно варьируют: 0.002–19 г/т Au и 0.04–573 г/т Ag, при этом в образцах зоны окисления они выше, чем в первичных рудах и вмещающих породах (табл.). Образцы с максимальными содержаниями БМ выбраны для детального изучения.

Первичные руды сложены пиритом и баритом; в них также присутствуют галенит, халькопирит, сфалерит, вюрцит, арсенопирит, алтаит, рутил, кварц и англезит. В алтаите отмечается примесь Ag до 0.64 мас. %. Наблюдаются обособления сульфида Pb, содержащего Se (0.29 мас. %), Sb (0.78 мас. %), Te (2.16 мас. %) и Ag (2.85 мас. %). Среди сульфосолей установлены теннантит и тетраэдрит, которые содержат Ag 0.47 и 0.75 мас. %, соответственно, а также иорданит. Самородное золото

Т а б л и ц а

Диапазон и средние содержания БМ в рудах Ново-Урского месторождения (г/т)

	Первичные руды		Зона окисления		Вмещающие породы с бортов карьера	
	Пиритовая руда	Выщелоченная пиритовая руда	Бурый железняк	Землистые гидроксиды Fe	Сланец (неокисленный)	Сланец (окисленный)
n	9	8	7	5	2	3
Au	<u>0.07–0.8</u> 0.2 (0.4)	<u>0.06–0.5</u> 0.24 (0.25)	<u>0.32–19</u> 0.74 (0.85)	<u>0.29–1.6</u> 0.65 (0.84)	<u>0.03–0.08</u> 0.05 (0.05)	<u>0.03–0.13</u> 0.06 (0.073)
Ag	<u>2.4–35</u> 19 (16)	<u>1.5–26</u> 9.4 (12.2)	<u>25–573</u> 37 (156)	<u>16–122</u> 28 (47)	<u>0.7–0.8</u> 0.72 (0.72)	<u>1.5–39</u> 31 (24)

Пр и м е ч а н и е. Числитель – минимальное–максимальное значения; знаменатель – медиана (среднее); n – количество анализов.

не встречено. Известны случаи, когда Ag в полиметаллических рудах находится в сульфосолях (теннантите) в виде дискретных коллоидных наночастиц («невидимое» Ag) и собственных фаз (акантит, пирсеит), причем эти формы, как правило, сосуществуют одновременно [Wu et al., 2016]. Схожесть ситуации позволяет нам предположить присутствие «невидимого» и «видимого» серебра в изученных рудах.

Химические формы нахождения Au в рудах Ново-Урского месторождения представлены двумя фракциями: окисляемой-1 и -2 (доля выхода 3–7 и 90–95 % от валового содержания, соответственно). Первая отражает растворение малоустойчивых к окислению сульфидов, вторая – более устойчивых. Доля остальных фракций невелика; их содержания находятся на уровне предела обнаружения ААС-спектрометра. Сопоставление минералогических и химических данных позволяет уверенно предполагать, что основная форма нахождения Au («невидимая») связана с сульфидами. Сумма долей водорастворимой, ионообменной и кислоторастворимой фракций Ag составляет ≤ 3 %. До 70–85 % от валового содержания Ag связано с восстанавливаемой фракцией, где обычно растворяются оксиды и гидроксиды Fe, Al, Mn и ярозит. Их наличие не подтверждается данными СЭМ, а Ag установлено как примесь только в сульфосолях и алтаите. До 10–20 % Ag растворилось при извлечении фракции окисляемая-1, 10–15 % – окисляемая-2 (отражающих растворение сульфидов разной степени устойчивости) и до 10 % – остаточной фракций. Сульфиды имеют различную устойчивость на начальной стадии окисления кислородом: сфалерит > галенит > пирротин > блеклые руды > арсенопирит > халькопирит > пирит [Свешников, 1967]. Следует ожидать, что легкоокисляемые минералы (носители Ag – сфалерит, галенит и блеклые руды), начинают разлагаться на окисляемой-1 стадии (pH = 4.2) и продолжают поступать в восстанавливаемую фракцию с увеличением интенсивности процесса (pH = 2–3). Не исключено формирование промежуточных соединений Ag, разрушающихся при извлечении восстанавливаемой фракции. Растворение более устойчивых сульфидов (халькопирит, пирит) должно происходить при выделении фракции окисляемая-2.

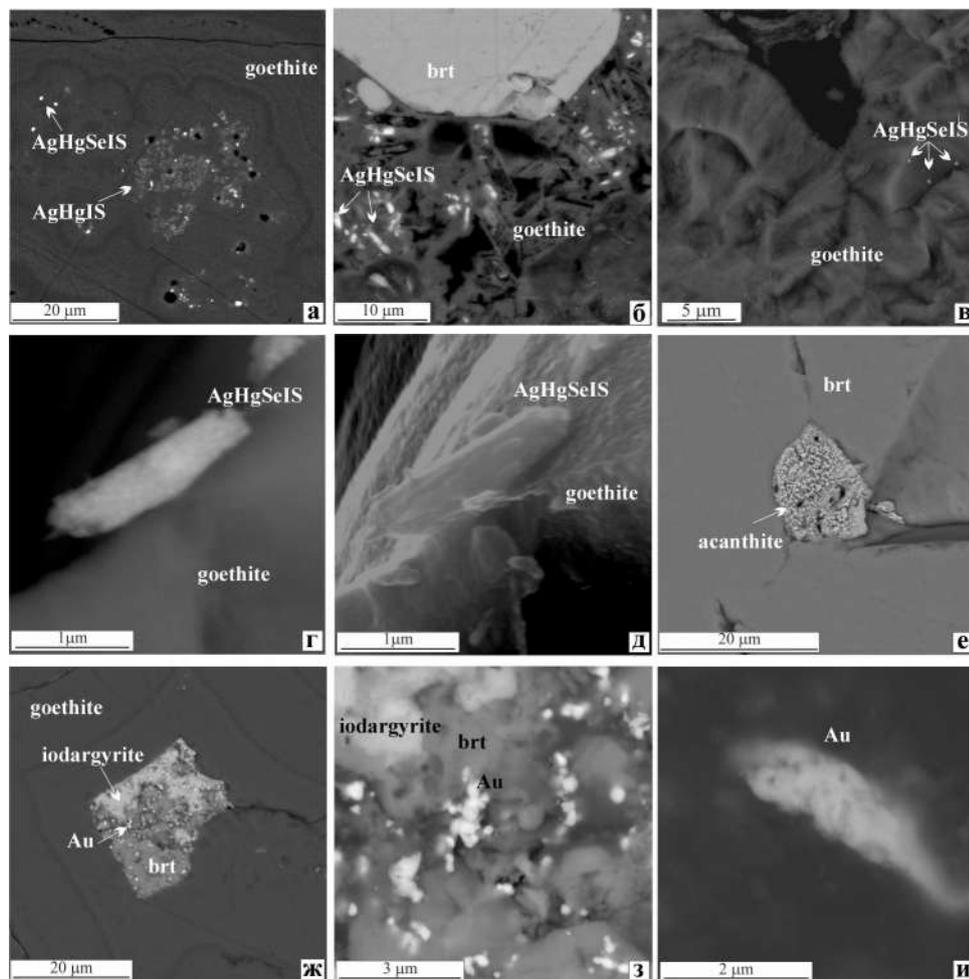


Рис. Минеральный состав руд зоны окисления: а) зонально-концентрический гетит (goethite) с зонами Ag-Hg сульфогалидов (AgHgSeIS); б) Ag-Hg сульфогалиды (AgHgSeIS) в полостях кристаллов, замещенных ярозитом и гетитом; в) скол поверхности гетита с наночастицами Ag-Hg сульфогалидов; г, д) кристалл сульфогалида игольчатой формы с неоднородной, мелкозернистой поверхностью; е) акантит (acanthite) и барит (brt); ж) срастание барита и йодаргирита (iodargyrite), на поверхности которого присутствует Au^0 среди гетита; з) увеличенный участок фото (ж); и) Au^0 среди гидроксидов Fe. Фото а-г, е-и – режим обратно-рассеянных электронов, фото д – режим вторичных электронов. Фото: а, б, г-и – полированные аншлифы и шашка (в).

Руды зоны окисления сложены гетитом, который содержит Sb (0.25 мас. %) и As (до 1.5 мас. %) и ярозитом с примесью Pb (8.5 мас. %) и As (до 1 мас. %). Гетит образует натечные концентрически-зональные, почковидные, волокнистые агрегаты; ярозит – псевдокубические кристаллы, местами зональные кристаллы с более светлыми центральными зонами, обогащенными Pb. Присутствуют псевдоморфозы гидроксидов

дов Fe по пириту. В рудах распространены хлорит, каолинит, гидрослюды, барит (0.5 мас. % Sr), кварц и, в меньшей степени, пирит, сфалерит, англезит. БМ формируют собственные минералы в рудах этого типа. В концентрических зонах гетита и полостях, выполненных совместно ярозитом и гетитом, установлены сложные по составу Ag-Hg галиды (рис.): иодсодержащие (без Br и Cl) и Br-содержащие (с I и Cl). Галиды содержат примеси S и Se и формируют мелкие кристаллы (≤ 5 мкм) игольчатой формы с неоднородной, мелкозернистой поверхностью. Состав сульфогалидов ближе всего к перрудиту ($\text{Ag}_4\text{Hg}_5\text{S}_5(\text{I},\text{Br})_2\text{Cl}_2$). Минерал подобной формы и состава обнаружен и в других зонах окисления [Sevillano et al., 2011]. Третья разновидность галидов – Ag-галиды (Cl-Br-I) без Hg, известные под общим названием эмболиты [Andreu et al., 2015], представлены в рудах Ново-Урского месторождения йодаргиритом (AgI). Йодаргирит совместно с пористым баритом заполняет крупные полости в гетите (рис. д). На поверхности полостей присутствуют частицы Au° размером $\sim 200\text{--}500$ мкм (рис. д–е), часть из которых содержит до 2 мас. % Hg. Наличие Cl-Br-I-Ag галогенидов также описано в бурых железняках Урала [Блинов, 2015]. Кроме того, в барите руд зоны окисления обнаружены включения акантита (Ag_2S ; рис. г) и сульфида Ag, который по стехиометрии близок стенбергиту (AgFe_2S_3) или ленаиту (AgFeS_2). Наблюдается наследование форм нахождения Ag в рудах зоны окисления и торфах, контактирующих с отходами, где установлены галогениды Ag, часто с Hg.

Формы нахождения Au и Ag в рудах этого типа различаются. Выщелачивание руд зоны окисления показало, что 80–90 % Au высвобождается с окисляемой-1 и -2 фракциями. Некоторая часть Au связана с восстанавливаемой фракцией (до 10.5 %). Доля остаточной фракции – 1.5–7 %. Очень незначительна доля легкоподвижных форм: водорастворимой, ионообменной и кислоторастворимой – их сумма варьирует от 0.04 до 0.8 % Au и от 0.06 до 0.77 % Ag. Всего 3.4–12.2 % Ag связано с окисляемой-1 и -2 фракциями, 21–60 % с восстанавливаемой, 30–74.4 % с остаточной. Во всех образцах из зоны окисления присутствует йодаргирит (AgI) в разных количествах. Минерал устойчив в широком диапазоне pH, поэтому мы предполагаем, что его основная доля может растворяться только при извлечении остаточной фракции. Возможно, наночастицы Au° разлагаются смесью 20 % HNO_3 и 20 % H_2O_2 , которая известна своими реакционными свойствами. На данном этапе предполагается, что в ходе проведения эксперимента в восстанавливаемую фракцию Au поступает за счет его адсорбции гидроксидами Fe, а Ag – за счет Ag-содержащего ярозита. Условия и стадии растворения перрудита пока не определены. Часть вопросов, возникших при интерпретации результатов эксперимента, требуют своего решения. Работы по уточнению воздействия различных реагентов на минералы руд золота продолжаются.

Благодарим М. А. Густайтис за помощь в отборе материала. Работы выполнены в рамках государственного задания № VIII.72.2.3(0330-2016-0011) в «ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН» и при поддержке РФФИ (№№ 16-35-60108, 15-05-05362, 15-05-06950).

Литература

Блинов И. А. Самородные металлы, селениды, галогениды и ассоциирующие минералы из бурых железняков Амурского и Верхне-Аршинского месторождений (Южный Урал) // Литосфера. 2015. Т. 1. С. 65–74.

- Болгов Г. П.* Сульфиды Салаира. Урская группа полиметаллических месторождений // Известия ТИИ. 1937. Т. 58. Вып. 1–3. С. 45–96.
- Жмодик С. М., Калинин Ю. А., Росляков Н. А. и др.* Наночастицы благородных металлов в зоне гипергенеза // Геология рудных месторождений. 2012. Т. 54. № 2. С. 168–183.
- Таусон В. Л., Кравцова П. Г., Смагунов Н. В. и др.* Структурное и поверхностно-связанное золото в пиритах месторождений разных генетических типов // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 2. С. 350–369.
- Свешников Г. Б.* Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях. Л.: ЛГУ, 1967. 160 с.
- Andreu E., Torró L., Proenza J. A. et al.* Weathering profile of the Cerro de Maimón VMS deposit (Dominican Republic): textures, mineralogy, gossan evolution and mobility of gold and silver // Ore Geology Review. 2015. Vol. 65. P. 165–179.
- Myagkaya I. N., Lazareva E. V., Gustaytis M. A. et al.* Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 2: Reprecipitation on natural peat // Journal of Geochemical Exploration. 2016. Vol. 165. P. 8–22.
- Mikhlin Yu., Romanchenko A., Likhatski M. et al.* Understanding the initial stages of precious metals precipitation: Nanoscale metallic and sulfidic species of gold and silver on pyrite surfaces // Ore Geology Review. 2011. Vol. 42. P. 47–54.
- Saryg-ool B. Yu., Myagkaya I. N., Kirichenko I. S. et al.* Redistribution of elements between wastes and organic-bearing material in the dispersion train of gold-bearing sulfide tailings. Part I. Geochemistry and mineralogy // Science of The Total Environment. 2017. Vol. 581–582. P. 460–471.
- Sevillano G. C., Rebollar M. C., Viñals Olià J.* Presencia en Localidades Españolas de Perroudita, Hg₅Ag₄S₅(I,Br)₂Cl₂, un Mineral "Raro" que Es Probablemente Frecuente // Conference: MACLA: Revista de la Sociedad Española de Mineralogía. 2011. №. 15. P. 45–46.
- Tagirov B. R., Trigub A. L., Shiryayev A. A. et al.* Covellite CuS as a matrix for “invisible” gold: X-Ray spectroscopic study of the chemical state of Cu and Au in synthetic minerals // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2016. Vol. 191. P. 58–69.
- Wu Zh., Konishi H., Wang Y. et al.* Occurrences and distribution of “Invisible” precious metals in sulfide deposits from the Edmond Hydrothermal Field, Central Indian Ridge // Ore Geology Review. 2016. Vol. 79. P. 105–132.

А. Ш. Хусаинова¹, Д. Г. Путин¹, В. А. Наумов², Б. М. Осовецкий¹

¹ – Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ), г. Пермь

² – Естественно-научный институт при ПГНИУ, г. Пермь
Alfiya061094@gmail.com

Золотоносность россыпи бассейна реки Удереи, Красноярский край

Цель работы – изучение золотоносности россыпи бассейна р. Удереи. Были поставлены следующие задачи: определить содержания и гранулометрическое распределение золота; изучить морфологию и рассчитать морфометрические параметры; определить химический состав золота.

Объект исследования находится в Мотыгинском районе Красноярского края на северо-восточном фланге Южно-Енисейской золотоносной провинции. Россыпь является аллювиальной мелкозалегающей однопластовой и приурочена к пойменной