

УДК 550.4 : 622.7

**ОСОБЕННОСТИ НАХОЖДЕНИЯ И ПОДВИЖНОСТЬ ЗОЛОТА
В ЛЕЖАЛЫХ ХВОСТАХ ЗОЛОТОИЗВЛЕКАТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ**

**Р. В. Борисов^{1,2}, В. И. Брагин^{1,2},
Н. Ф. Усманова^{2,1}, А. А. Плотникова^{1,2}**

¹*Сибирский федеральный университет, E-mail: vic.bragin@gmail.com,
просп. Свободный, 79, 660041, г. Красноярск, Россия*

²*Институт химии и химической технологии СО РАН — Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,
E-mail: roma_boris@list.ru, Академгородок, 50/24, 660036, г. Красноярск, Россия*

Изучены особенности гранулометрического и вещественного состава технологических проб лежалых хвостов сульфидных и окисленных руд. Показано распределение золота по классам крупности: более 50 % золота содержится в тонких классах – 0.044 мм. Методом газовой адсорбции выявлено, что пробы хвостов имеют высокую удельную поверхность, которая играет важную роль в процессах переосаждения и миграции золота и сопутствующих компонентов. Обнаружен факт корреляции золота с железосодержащими формами, что может быть использовано для его извлечения магнитными методами. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии определено отсутствие в пробах хвостов значимых количеств углистых веществ, которые могут сорбировать золото. Установлена возможность образования в пробах хвостов нерастворимых осадков цианоферратов железа, на которых происходит самопроизвольное осаждение подвижного золота в виде частиц микронных размеров.

Золотосодержащие хвосты, вещественный состав, подвижное золото, геохимический анализ, магнитная сепарация

DOI: 10.15372/FTPRPI20200115

Интенсивное развитие золотодобывающей отрасли в предыдущие десятилетия привело к накоплению больших объемов техногенных отвалов, в которых содержится значительное количество ценных компонентов. По мере снижения содержания золота в исходных рудах, а также вследствие высокой экологической нагрузки, оказываемой техногенными отвалами на окружающую среду, растет востребованность в эффективных и экономически целесообразных технологиях извлечения ценных компонентов из вторичного сырья [1, 2].

Разработка и освоение технологии извлечения золота из накопленных техногенных минеральных объектов (отвалов, хвостов и воды золотоизвлекательных фабрик) весьма актуально для многих золотодобывающих предприятий. В связи с тем, что хвосты отличаются низким содержанием золота и находятся в труднообогащаемой форме из-за процессов окисления, выщелачивания, переосаждения, для их переработки необходимо как привлечение существующих методов обогащения, так и разработка новых оригинальных подходов [3 – 9]. В последние годы разрабатываются ультразвуковые и магнитно-импульсные методы переработки хвостов [4], аг-

ломерационной флокуляции с последующей флотацией [5], применяются новые собиратели и модификаторы при флотации техногенного сырья [6–8], биогидрометаллургические технологии [9] и др.

Несмотря на актуальность задачи, работы по изучению форм нахождения и миграции элементов в хвостохранилищах золотоизвлекательных фабрик немногочисленны [10–13]. Установлено, что золото не распределено равномерно по объему заводского хвостохранилища, а сконцентрировано на локально обогащенных участках, соседствующих с местами слива пульпы [10]. При изучении вещественного состава хвостовых отвалов следует учитывать, что свободное золото обычно покрыто пленками гидроксидов железа. Показаны механизмы переноса золота за счет процессов растворения – переосаждения на других минералах либо за счет образования коллоидного золота с последующей коагуляцией [10]. Переходное, легко мигрирующее золото принято называть невидимым. Особенности его физико-химического состояния рассмотрены в [11]. Коллоиды могут содержать очень высокие концентрации золота и принимать активное участие в образовании высокосортных накоплений золота в гипогенных системах [13]. Растворенное золото, находящееся в хвостохранилище в виде ионов, крайне легко восстанавливается с использованием как химических восстановителей, так и при различном облучении (ультразвук, ультрафиолет) [14]. В присутствии ионов Fe^{2+} могут восстанавливаться ионы Au^{3+} , образуя оксиды железа (ферригидриты, гетит) с наночастицами золота [15]. Подвижность благородных металлов в хранилищах хвостов отмечена в [12, 13], процессы миграции золота и серебра исследовались в Урском хвостохранилище. Невидимое золото выявлено во взвешенной форме и в коллоидном состоянии. Обнаружен факт концентрирования золота (до 155 г/т) на торфяных органических веществах [13]. Рассмотрены процессы миграции подвижного золота в природных водных экосистемах [16]. Показано, что отдельные частицы золота становятся подвижными и впоследствии осаждаются на окислах железа и органических составляющих, которые тесно связаны с илистыми или глинистыми донными отложениями.

Таким образом, изучение форм нахождения золота в хвостах является актуальной задачей как для их повторной переработки, так и для оптимизации существующих технологий. Цель настоящей работы — изучение вещественного состава и форм нахождения золота в лежалых хвостах золотообогатительной фабрики Красноярского края.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В 2016 г. на хвостохранилище отобраны 65 керновых проб, из которых сформированы три усредненные технологические пробы хвостов сульфидных (ТПХ-1), смешанных (ТПХ-2) и окисленных руд (ТПХ-3). Минералогический и химический состав проб изучен с помощью рентгенофлуоресцентного, рентгенофазового и пробирного анализов. Содержание элементов в водных фазах определено методами масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и атомно-абсорбционным анализом. Гранулометрический состав выполнен ситовым методом, выделение фракций – 0.020 + 0.010, – 0.010 + 0 мм — седиментационным анализом.

Микроскопические исследования проводили методом сканирующей электронной микроскопии на приборе TM3000 (Hitachi, Япония) с системой микроанализа Quantax 70 (Bruker, Германия). Термогравиметрические (ТГ) кривые и кривые дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) снимали на приборе синхронного термического анализа NETZSCH STA 449 C/4/G Jupiter с квадрупольным масс-спектрометром QMS 403C Aëolos в проточной атмосфере аргона

(30 мл/мин) со скоростью нагрева 10 град/мин в платиновых тиглях. Регистрацию изотерм адсорбции азота для исследуемых проб осуществляли анализатором ASAP-2420 (Micromeritics, USA) при 77 К, расчет удельной поверхности образцов — с использованием модели BET.

С целью установления взаимосвязи золота с различными минеральными формами выполняли геохимический анализ на классе крупности –0.074 мм по методике [17]. Для определения водорастворимых и обменных форм пробу обрабатывали ацетатом аммония в кислой среде. На втором этапе в жидкую фазу выделяли карбонатную и сульфатную составляющие обработкой раствором уксусной кислоты. На третьем этапе переводили в раствор золото, связанное с органической составляющей, с применением пиррофосфата натрия в щелочных условиях. Для определения аморфных оксидов использовали раствор гидроксиламин гидрохлорида в соляной кислоте, а для кристаллических оксидов — раствор $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ в уксусной кислоте. На заключительной стадии остаток растворяли в царской водке для получения остаточной концентрации благородных элементов.

Тесты по магнитной сепарации проводили на роликовом сепараторе ЭВС-10/5 при напряжении магнитного поля 9А и на высокоградиентном сепараторе, где в качестве магнитного носителя применялась дробь крупностью 3 и 5 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Материал хвостов представлен преимущественно дисперсной пылеватой фракцией. Цвет варьирует от светло-серого (продукты переработки неокисленных руд) до светло-бурого (хвосты обогащения окисленных руд). В преобладающей массе дисперсного материала присутствуют обломки горных пород (сланцев), единичные зерна кварца и граната, единичные вторичные сrostки пылеватых и песчаных частиц, сцементированные гипсом (для хвостов переработки сульфидных руд) и гидроокислами железа (для хвостов окисленных руд).

В табл. 1 приведен химический состав технологических проб. Основные рудные минералы — пирит, магнетит, арсенопирит, пирротин, антимонит. В пробах хвостов переработки сульфидных руд обнаружены единичные включения первичных минералов сурьмы (джерсонит, гудмундит, бертьерит) и галенита. Главными нерудными минералами являются кварц, мусковит, биотит, кальцит, хлорит, второстепенными — доломит, альбит, гипс. Основной порообразующий элемент — кварц, содержание которого варьирует от 58 до 81 % при переходе от пробы ТПХ-1 к ТПХ-3. При переходе от проб хвостов переработки сульфидных руд к пробам хвостов переработки окисленных руд цвет зерен кварца меняется от бесцветного, молочно-белого к желтоватому и светло-бурому, что связано с окрашиванием включениями и пленками гидроокислов железа. Размеры зерен кварца составляют от 5 мкм до десятых долей миллиметров.

ТАБЛИЦА 1. Химический состав технологических проб, %

Проба	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MnO	SiO ₂
ТПХ-1	0.76	2.04	9.99	2.49	10.46	0.24	58.28
ТПХ-2	0.54	1.86	8.38	2.14	10.14	0.24	61.79
ТПХ-3	0.15	0.69	6.58	1.51	2.11	0.31	80.45
Проба	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	S	Sb	TiO ₂	Au, г/т	Ag, г/т
ТПХ-1	0.14	5.35	0.64	0.11	0.46	0.64	0.18
ТПХ-2	0.13	4.58	0.56	0.15	0.38	0.72	0.23
ТПХ-3	0.09	4.52	0.10	0.27	0.31	0.36	0.35

Важная особенность минералогического состава — наличие в пробах хвостов новообразованных фаз гипса, который отсутствовал в исходных рудах. Вторично образованные фазы гипса обнаружены в хвостах переработки сульфидных руд, а в пробах ТПХ-3 практически отсутствуют. Это может быть связано с высвобождением сульфатной серы при окислении сульфидов и с переносом сульфатов с оборотными водами в верхних частях хвостохранилища. Электронно-микроскопически установлено, что гипс присутствует в виде рыхлых дисперсных окамлений и налетов на поверхности различных минеральных фаз. Вторая особенность — широкое присутствие лимонита в виде смеси гетита с гидрогетитом, лепидокрокитом, гематитом, карбонатами и другими вторичными минералами в пробах хвостов ТПХ-1 и ТПХ-3. В составе вторичных фаз на основе лимонита обнаружены примеси фосфора, мышьяка, сурьмы и других микроэлементов, которые сорбируются высокоразвитой поверхностью гидроокислов железа и находятся в виде микровключений. Вторичные минералы сурьмы выявлены на гидроокислах железа (рис. 1). Их образование отражает процесс миграции элементов в хвостохранилище.

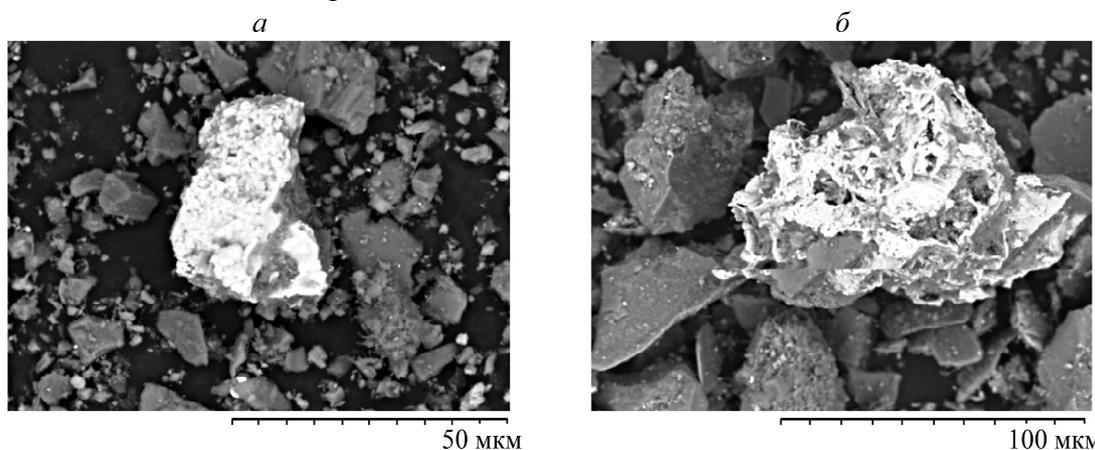


Рис. 1. СЭМ-изображения: *а* — проба ТПХ-1, вторично образованные фазы сурьмы, лимонита и гипса (светлая область) на частице кварца (темная область); *б* — проба ТПХ-3, частица кварца (темная), покрытая смесью окисленных минералов сурьмы и гидроокислов железа (светлая область)

Гранулометрический состав проб (табл. 2) характеризуется высоким содержанием шламовой фракции: доля класса -0.044 мм — 50–65%; класса -0.020 мм — 14–27%. Седиментационный анализ показал, что выход класса -0.010 мм составляет менее 0.3%. Данный факт можно объяснить либо выносом тонкого класса при формировании осадка хвостов вглубь хвостохранилища, либо агломерацией в процессе хранения хвостов. Высокое содержание извести в хвостохранилище вполне может приводить к цементации хвостов.

Распределение золота по классам крупности неоднородно, особенно для хвостов переработки окисленных руд, в которых песчаные фракции резко обеднены. Среднее содержание золота в классе -0.044 мм составляет в пробах сульфидных, смешанных и окисленных хвостов соответственно 0.61, 0.76, 0.44 г/т; в классе $-0.100+0.044$ мм — 0.41, 0.41, 0.21 г/т. Золото концентрируется в тонких классах: извлечение его в класс -0.044 мм составляет 53, 72, 74% в пробах ТПХ-1, ТПХ-2, ТПХ-3 соответственно.

Обнаружено расхождение между содержанием золота в исходных пробах (прямой анализ) и содержанием, определенным по балансу классов крупности гранулометрического анализа, которое ниже на 15–35%. Это свидетельствует о наличии подвижных форм золота в хвостохранилище, когда при гранулометрическом расसेве с водой вымываются коллоидные и подвижные формы золота.

ТАБЛИЦА 2. Гранулометрический состав технологических проб, %

Класс крупности, мм	ТПХ-1		ТПХ-2		ТПХ-3	
	γ	ε_{Au}	γ	ε_{Au}	γ	ε_{Au}
+0.140	2.59	5.99	1.88	3.95	0.82	0.34
-0.140+0.100	4.92	6.81	6.65	7.63	5.23	6.75
-0.100+0.074	12.39	13.00	9.89	7.73	13.67	10.26
-0.074+0.063	2.04	1.97	3.27	1.77	5.01	3.55
-0.063+0.044	27.56	19.08	13.59	6.85	24.89	5.19
-0.044+0.020	23.35	26.79	49.48	54.18	35.58	40.03
-0.020+0.010	26.88	26.06	15.16	17.65	14.74	33.77
-0.010+0	0.27	0.30	0.09	0.24	0.06	0.11
Итого	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

В результате изучения вещественного состава хвостов установлены особенности по формам нахождения золота. В большинстве случаев золото образует тонковкрапленные вроски в арсенопирите, замещаемом пирротинном. При замещении происходит концентрирование невидимого золота в отдельные части кристалла арсенопирита и формирование его дисперсных частиц. Присутствие повышенного содержания золота в хвостах неокисленных руд косвенно указывает на арсенопирит, как основной носитель золота в хвостах.

Выявлено достаточно высокое содержание золота в тонких фракциях, обогащенных гидроокислами железа, что может быть связано с сорбцией золота на активной поверхности лимонита. Основной компонент лимонита — гетит способен осаждать на своей поверхности золото из раствора [15, 18]. В тонких классах обнаружено увеличение содержания железа с возрастанием доли рентгеноаморфной составляющей, что связано с накоплением высокодисперсного лимонита, а также вторично образованные минералы сурьмы и мышьяка. Измерения текстурных характеристик подтвердили высокую удельную поверхность материалов хвостов (табл. 3), которая составила более $3.9 \text{ м}^2/\text{г}$. Принимая форму частиц, близкую к сферической, и допуская, что частицы имеют одинаковый размер, можно оценить диаметр частиц в хвостах, значения которого составили меньше микрометра. Развитая удельная поверхность обусловлена присутствием либо углеродсодержащих веществ с высокой пористостью, либо шламовых частиц менее 50 нм, которые могут давать такой значительный вклад в поверхность.

ТАБЛИЦА 3. Текстуальные характеристики технологических проб

Проба	Крупность, мм	$S_{уд}$, $\text{м}^2/\text{г}$	Объем пор, $\text{см}^3/\text{г}$	Размер пор, нм	Средний диаметр частиц (оценка), мкм
ТПХ-1	-0.010+0	22.1	0.08	14	0.12
ТПХ-1	-0.100+0	4.3	0.03	30	0.61
ТПХ-2	-0.100+0	4.5	0.03	28	0.58
ТПХ-3	-0.010+0	23.1	0.07	14	0.11
ТПХ-3	-0.100+0	3.9	0.03	12	0.67

Для выяснения присутствия высокопористых органических форм проведен термический анализ проб крупности -100+0 и -10+0 мкм. В технологических пробах крупностью -100 мкм обнаружены эндотермические эффекты в интервале 100–110 °С, связанные с потерей воды, и при 574 °С без потери массы, связанные с фазовым переходом альфа-бета кварца. На пробе ТПХ-3 в крупности -100+0 мкм в интервале 250–305 °С выявлен эндотермический пик (рис. 2а), сопровождающийся потерей массы — 0.32%. Данный эффект может быть обусловлен дегидратацией гетита. В случае материала ТПХ-3 в крупности -10 мкм проявляется экзотермический эффект при 325 °С (рис. 2б), сопровождающийся потерей массы более 1%, что может

быть вызвано окислением органических форм. При этом масс-спектрометрическим анализом зафиксировано выделение углекислого газа. Обобщая полученные результаты по количеству выделяемых при нагреве газов, а также учитывая низкий выход фракции –10 мкм, можно заключить, что в исходных пробах хвостов наличие значимых количеств органических форм маловероятно. Наиболее возможная причина высокой удельной поверхности хвостов — образование вторичных минералов железа и сурьмы в дисперсном состоянии.

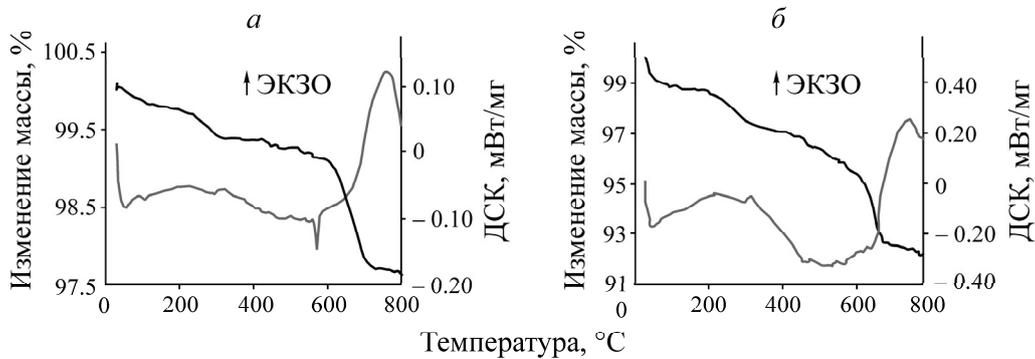


Рис. 2. ДСК–ТГ-кривые нагрева пробы ТПХ-3 разной крупности на воздухе: – 100 мкм (а), – 10 мкм (б)

Подвижное золото и связи его с минералами хвостов изучались с помощью геохимического анализа методом последовательного растворения селективными растворителями. Результаты связи золота с различными формами представлены на рис. 3а. Золото в обменных и карбонатно-сульфатных формах является хорошо мигрирующим элементом, который в зависимости от рН среды хвостохранилища может находиться в растворенном состоянии либо осаждаться на различных минеральных формах. В относительно подвижных формах находится до 23 % золота в хвостах сульфидных и смешанных руд и до 10 % — в окисленных. Согласно геохимическому анализу, обнаружен факт связи золота с кристаллическими оксидами железа, особенно в пробе хвостов окисленных руд. Связи золота с аморфными оксидами железа отсутствуют.

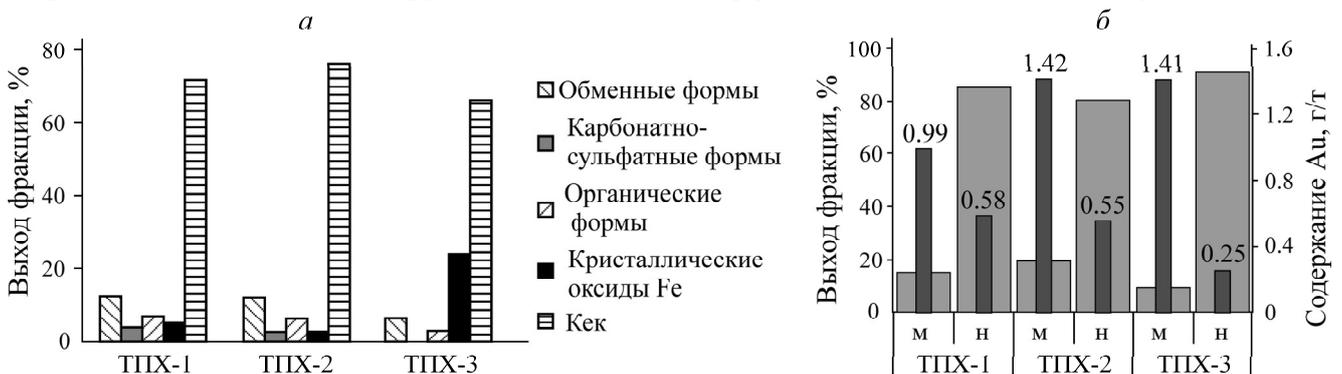


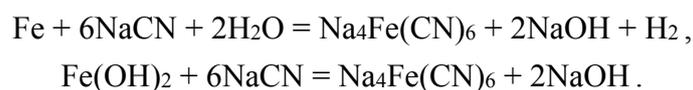
Рис. 3. Распределение золота по формам нахождения (а) и по продуктам магнитной сепарации (б): м — магнитная; н — немагнитная

Для подтверждения связи золота с фазами железа проведены исследования методом магнитной сепарации. На рис. 3б приведены данные по выходам магнитных и немагнитных продуктов и распределению в них золота. Полученные результаты подтверждают факт тесной связи золота с оксидами железа, в большей мере в пробе ТПХ-3. При токе 9 А содержание золота в магнитном продукте составляет 1.41 г/т, в то время как в исходном 0.36 г/т. Выход магнитной фракции для пробы ТПХ-3 составил 9.6 % с извлечением золота 37.5 %. Для хвостов перера-

ботки окисленных руд можно рекомендовать использование магнитных методов обогащения. Для хвостов переработки сульфидных руд (ТПХ-1) применение магнитных методов нецелесообразно — извлечение золота составило 22.8 % при выходе магнитной фракции 14.8 %.

Для выявления легкоподвижных и дисперсных форм золота, например связанных с железосодержащими фазами, проведена серия экспериментов по обработке исходных проб хвостов слабощелочным раствором. При контакте пробы хвостов переработки сульфидных руд (ТПХ-1) в течение 24 ч при 25 °С с 0.1 М раствором гидроксида натрия происходит выщелачивание в раствор некоторых элементов: мышьяка (73 ± 15 мг/л), кальция (190 ± 30 мг/л), железа (22 ± 5 мг/л), калия (150 ± 25 мг/л), меди (0.5 ± 0.1 мг/л), золота (0.09 ± 0.03 мг/л). Переход данного количества золота соответствует 15 %, что согласуется с ранее указанным несоответствием содержания золота при прямом анализе и при гранулометрическом расसेве. Раствор, отделенный от твердой фазы фильтрованием под вакуумом (размер пор фильтра 3–5 мкм), имеет слегка желтоватую окраску и pH 12. В твердой фазе, согласно пробирному анализу, содержание золота снизилось с 0.64 до 0.56 г/т.

По литературным данным растворимость $\text{Fe}(\text{OH})_2$ и $\text{Fe}(\text{OH})_3$ в воде составляет 0.5 и 0.0002 мг/л соответственно [19]. Железо присутствует в растворе не в виде гидроксида, а в виде комплексного иона, предположительно гексацианоферроата $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$. Образование этого иона запишем следующими реакциями:



Образование и переход комплексного иона в раствор при подщелачивании проб хвостов вполне вероятен ввиду наличия остаточных количеств циан-иона в хвостохранилище и использования в схеме обогащения гидрометаллургических операций (цианирование и сорбция на ионообменную смолу или уголь). Цианиды могут сорбироваться на фазах, обладающих развитой удельной поверхностью, таких как гидраты окиси железа (гетит, лимонит), коллоидных веществах, вторичных илах и впоследствии участвовать в процессах растворения тонкого золота в хвостохранилище.

При добавлении серной кислоты до pH 1.3 раствор приобретает сине-зеленую окраску и постепенно образуется осадок синего цвета, вероятно берлинская лазурь, а также выпадает белый осадок гипса (рис. 4а). После образования осадков ионов золота в растворе методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой не обнаружено, а концентрация железа составляет 2 мг/л. Вероятно, золото из раствора восстанавливается, например ионами Fe^{2+} [14, 15]. Рентгено-спектральным микроанализом обнаружены частицы золота микрометровых размеров на гипсе (рис. 4а) и гексацианоферратах железа (рис. 4б).

Для проб хвостов переработки окисленных руд (ТПХ-3) образование аналогичных осадков гексацианоферратов железа практически не наблюдается, что может быть связано с более низкой концентрацией циан-иона и другим химическим составом материала в нижних слоях хвостохранилища. С течением времени железо присутствует только в окисленной малорастворимой трехвалентной оксидной форме. В растворе после выщелачивания концентрация железа составляет менее 1.6 мг/л. В то же время обнаружен переход в раствор золота 0.23 ± 0.08 мг/л, а также кальция 57 ± 15 мг/л, мышьяка 175 ± 30 , сурьмы 15 ± 5 и вольфрама 38 ± 10 мг/л. Данная концентрация соответствует переходу в раствор 38 % золота, что удовлетворительно согласуется с содержанием золота в твердой фазе (0.24 г/т), определенным пробирным анализом. Предположительно, в раствор переходит золото двух типов, связанное (сорбированное) с вторичными дисперсными фазами, содержащими мышьяк и сурьму, и коллоидное свободное золото. После нейтрализации до pH 1.3 серной кислотой происходит образование незначительных количеств осадка гипса. Однако обнаружить на осадке частицы золота не удалось. Действительно, осажде-

ния золота не происходит, концентрация золота, сурьмы и мышьяка в растворе практически не изменилась. Данный факт косвенно подтверждает механизм осаждения золота соединениями железа.

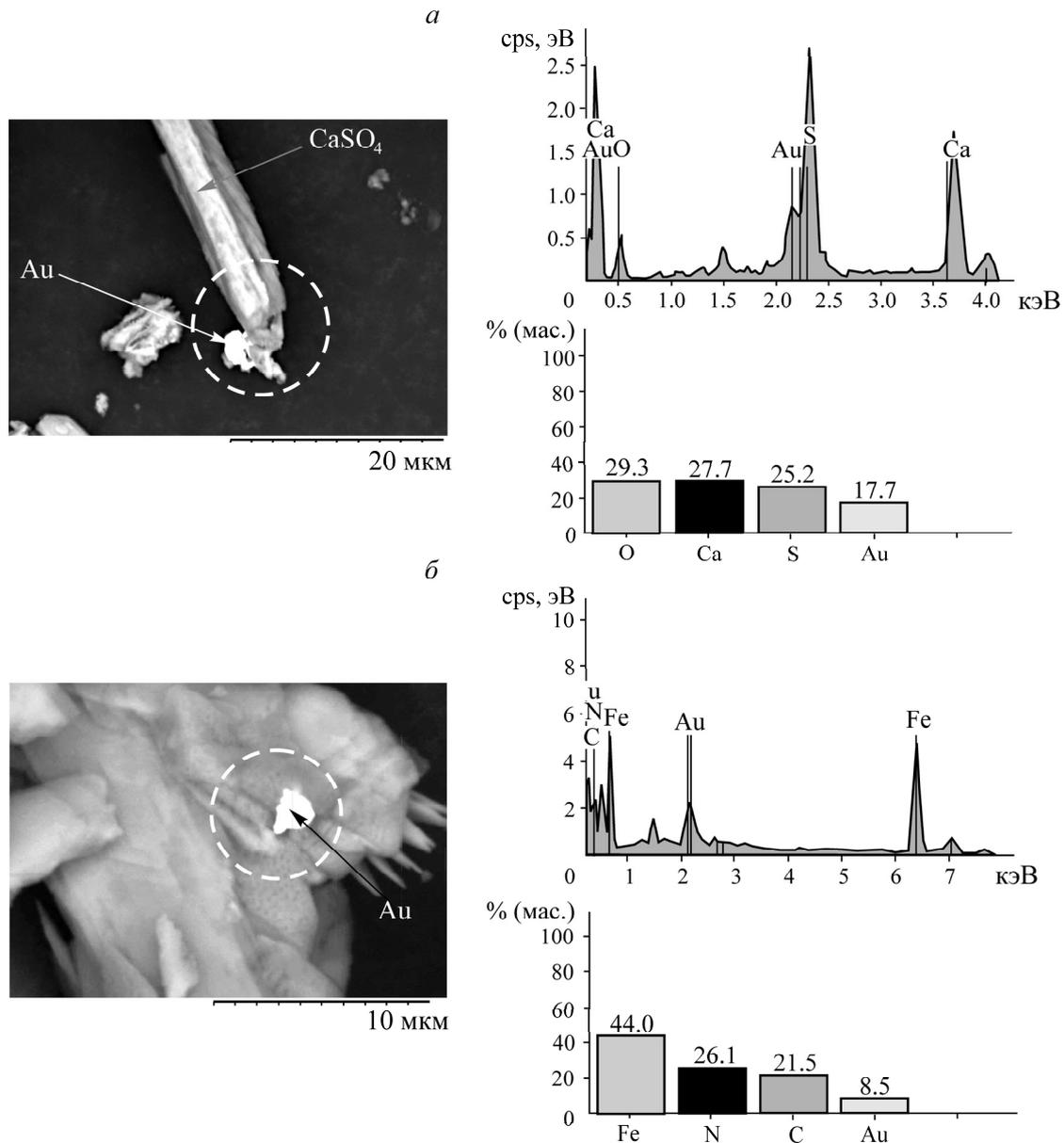
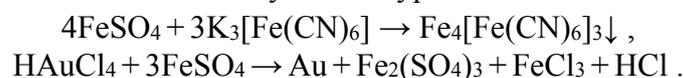


Рис. 4. СЭМ-изображение: *а* — частицы золота на гипсе в осадке, сформировавшемся после обработки пробы ТПХ-1 щелочным и кислым раствором, и результаты рентгеноспектрального анализа с выделенной области; *б* — осадка гексацианоферрата железа с частицей золота и результаты рентгеноспектрального анализа с выделенной области

С целью установления морфологических особенностей формирования металлических частиц золота проведены эксперименты по восстановлению золота (III) железом (II), моделирующие образование осадка берлинской лазури. Для этого в водный раствор красной кровяной соли добавляли раствор HAuCl_4 и вносили концентрированный раствор сульфата железа (II). Данный процесс схематично опишем следующими уравнениями:



При введении в контакт указанных реагентов происходит образование осадка темно-синих кристаллов, нерастворимых в воде. На рис. 5 показаны результаты электронно-микроскопических исследований высушенного осадка. Обнаружены многочисленные дисперсные частицы золота с размерами 0.1–1.0 мкм. Аналогичные процессы могут протекать в условиях хвостохранилища при изменении химического состава и кислотности среды.

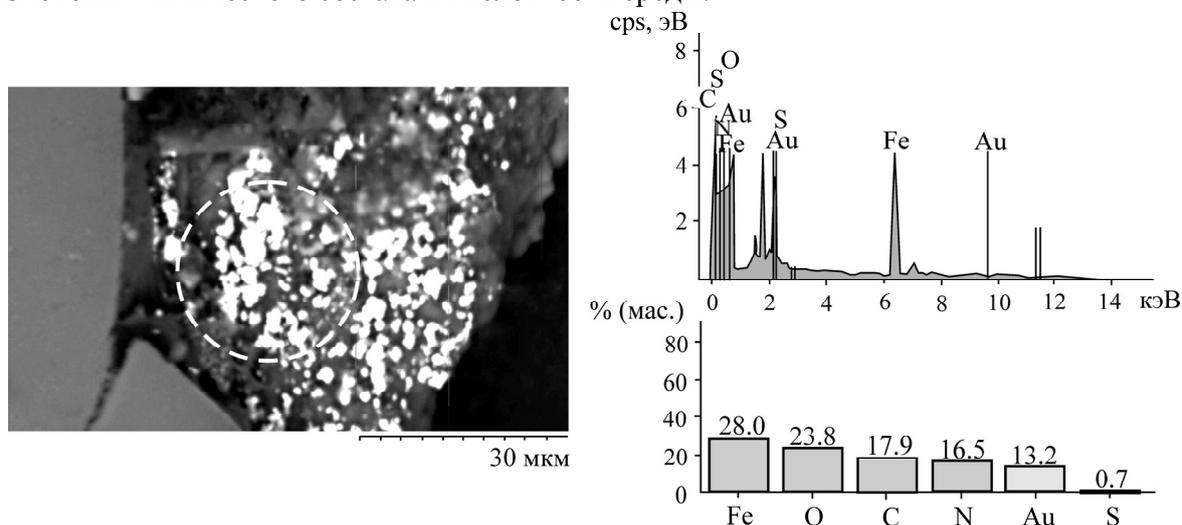


Рис. 5. СЭМ-изображение частиц золота (светлые частицы), образующихся на осадке, представляющем смесь сульфата железа и гексацианоферратов (темный), и результаты рентгеноспектрального анализа с выделенной области

ВЫВОДЫ

Исследования золотосодержащих хвостов переработки сульфидных и окисленных руд показали, что для них характерна высокая удельная поверхность, 3.9–4.3 м²/г, которая обусловлена присутствием дисперсных вторичных минералов железа, сурьмы и мышьяка. Более половины золота приходится на шламовые фракции –0.044 мм, что может быть вызвано с его осаждением на дисперсных вторичных минералах. Геохимическими исследованиями установлено, что <30% золота в хвостах связано с обменными и карбонатно-сульфатными формами, для которых характерна подвижность в обводненных условиях хвостохранилища. В пробе хвостов переработки окисленных руд обнаружена связь золота с железосодержащими фазами, что позволяет рассмотреть возможности применения магнитных методов обогащения для его извлечения. Предложен механизм осаждения золота в присутствии соединений железа (II), который проявляется в пробах хвостов переработки сульфидных руд. В хвостах переработки окисленных руд обнаружено <30% подвижного золота, коллоидного и связанного с высокодисперсными вторичными минералами.

Работа частично выполнена с использованием оборудования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН. Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией рентгеновских и спектральных методов анализа к.т.н. А. М. Жижяеву за проведение электронно-микроскопических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В. А., Козлов А. П., Матвеева Т. Н., Лавриненко А. А. Инновационные технологии и процессы извлечения ценных компонентов из нетрадиционного, труднообогатимого и техногенного минерального сырья // ФТПРПИ. — 2012. — № 5. — С. 144–156.
2. Комогорцев Б. В., Вареничев А. А., Потапов И. И. Технологии и методы ресурсосбережения минерально-сырьевой базы золота России // Экономика природопользования. — 2015. — № 3. — С. 89–112.

3. **Шадрунова И. В., Горлова О. Е., Провалов С. А.** Адаптивные методы доизвлечения золота из хвостохранилищ золотоизвлекательных фабрик // ГИАБ. — 2011. — № 9. — С. 21–27.
4. **Гурин К. К., Башлыкова Т. В., Ананьев П. П., Бобоев И. Р., Горбунов Е. П.** Извлечение золота из хвостов золотоизвлекательной фабрики от переработки упорных руд смешанного типа // Цв. металлы. — 2013. — № 5. — С. 41–45.
5. **Алгебраистова Н. К., Макшанин А. В., Бурдакова Е. А., Маркова А. С.** Извлечение золота из хвостов золотоизвлекательной фабрики с использованием процесса агломерационной флокуляции // ГИАБ. — 2013. — № 12. — С. 56–61.
6. **Брагина В. И., Коннова Н. И.** Извлечение ценных минералов из хвостов обогащения // ГИАБ. — 2011. — № 12. — С. 165–167.
7. **Кондратьев С. А., Бурдакова Е. А.** Роль физической формы сорбции во флотационном процессе // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 135–144.
8. **Брагин В. И., Бурдакова Е. А., Кондратьева А. А., Плотникова А. А., Бакшеева И. И.** Исследование на обогатимость флотационным методом лежалых золотосодержащих хвостов // ФТПРПИ. — 2018. — № 4. — С. 152–160.
9. **Койжанова А. К., Арыстанова Г. А., Седельникова Г. В., Есимова Д. М.** Исследование биогидрометаллургической технологии извлечения золота из хвостов сорбции золотоизвлекательной фабрики // Цв. металлы. — 2016. — № 9. — С. 52–57.
10. **Меретуков М. А., Гурин К. К.** Поведение золота в хвостовых отвалах // Цв. металлы. — 2011. — № 7. — С. 27–31.
11. **Hough R. M., Noble R. R. P., and Reich M.** Natural gold nanoparticles, *Ore Geol. Rev.*, 2011, Vol. 42, Issue 1. — P. 55–61.
12. **Михайлов А. Г., Харитоновна М. Ю., Вашлаев И. И., Свиридова М. Л.** Исследование подвижности водорастворимых форм цветных и благородных металлов в массиве лежалых хвостов обогащения // ФТПРПИ. — 2013. — № 3. — С. 188–196.
13. **Myagkaya I. N., Lazareva E. V., Gustaytis M. A., and Zhmodik S. M.** Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 1: migration in water flow, *J. Geochem. Explor.*, 2016, Vol. 160. — P. 16–30.
14. **Daniel M. C. and Astruc D.** Gold nanoparticles: assembly, supramolecular chemistry, quantum-size-related properties, and applications toward biology, catalysis, and nanotechnology, *Chem. Rev.*, 2004, Vol. 104, Issue 1. — P. 293–346.
15. **Greffié C., Benedetti M. F., Parron C., and Amouric M.** Gold and iron oxide associations under supergene conditions: An experimental approach, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, Vol. 60, Issue 9. — P. 1531–1542.
16. **Shuster J., Reith F., Cornelis G., Parsons J. E., Parsons J. M., and Southam G.** Secondary gold structures: Relics of past biogeochemical transformations and implications for colloidal gold dispersion in subtropical environments, *Chem. Geol.*, 2017, Vol. 450. — P. 154–164.
17. **Piatak N. M., Parsons M. B., and Seal II R. R.** Characteristics and environmental aspects of slag: review, *Appl. Geochem.*, 2015, Vol. 57. — P. 236–266.
18. **Berrodier I., Farges F., Benedetti M., Winterer M., Brown Jr, G. E., and Deveughèle M.** Adsorption mechanisms of trivalent gold on iron-and aluminum-(oxy) hydroxides. Part 1: X-ray absorption and Raman scattering spectroscopic studies of Au (III) adsorbed on ferrihydrite, goethite, and boehmite, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, Vol. 68. — P. 3019–3042.
19. **Справочник химика. Т. 1 / ред. кол.: Б. П. Никольский и др.** — М.; Л.: Химия, 1966. — 1072 с.

Поступила в редакцию 01/XI 2018

После доработки 22/X 2019

Принята к публикации 04/II 2020