

УДК 549.086; 552

**МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ
ХВОСТОХРАНИЛИЩА ЗОЛОТОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ФАБРИКИ**

**В. И. Брагин^{1,2}, В. А. Макаров¹, Н. Ф. Усманова^{1,2},
П. Н. Самородский¹, Б. М. Лобастов¹, А. И. Вашлаев^{1,2}**

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

²Институт химии и химической технологии СО РАН,
Обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН,
ул. Академгородок, 50, стр. 24, 660036, г. Красноярск, Россия

Представлены результаты минералогических исследований лежалых хвостов переработки сульфидных и окисленных золотосодержащих руд одного из горно-металлургических предприятий Красноярского края. Материал хвостохранилища представлен как первичными, так и вторичными минеральными формами. Из вторичных минеральных образований обнаружены минералы сурьмы валентинит Sb_2O_3 и трипугит $FeSbO_4$, вторичные формы минералов железа. Гипс в техногенном материале является новообразованной фазой, не встречающейся в исходных рудах, отмечается в хвостах обогащения сульфидных и смешанных руд и почти отсутствует в хвостах переработки окисленных руд. Основным ценным компонентом — золото, представленное тонкими сростками в арсенопирите, крупность свободного золота не превышает первых микрон.

Золотосодержащие сульфидные и окисленные руды, хвосты обогащения, вторичные минеральные формы, гипергенные преобразования

DOI: 10.15372/FTPRPI20190118

Неотъемлемой составной частью горно-металлургических комплексов являются хвостохранилища, которые создают огромную техногенную нагрузку на экологию и ландшафт регионов добычи [1–3], в некоторых случаях приводящую к техногенным бедствиям [4]. В то же время хвосты обогащения руд сульфидного, окисленного состава — потенциальная минерально-сырьевая база для извлечения благородных и цветных металлов [5–9]. По различным оценкам, ежегодные отходы горно-металлургического производства в России составляют > 5 млрд т [10]. В отечественной практике, начиная с 2000-х годов, вопросами повторной переработки техногенного сырья различного вещественного состава занимаются как недропользователи, так и научно-исследовательские организации [11–13]. В золотодобыче в повторную переработку вовлекаются в основном техногенные россыпные объекты, поскольку минеральный состав и крупность золота позволяет без больших капитальных затрат получить максимальный результат [14–16].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности (проект № 18-45-242001) и фундаментальных исследований Российской академии наук (проект № V.46.1.1).

Техногенное сырье большинства золотосодержащих хвостохранилищ, сформировавшихся в результате переработки руд сульфидного, смешанного состава по флотационной, флотационно-гидрометаллургической технологии, представляют собой сложный, труднообогатимый объект, где ценный компонент в меньшей степени находится в свободном виде, в большей — представлен тонкой вкрапленностью, зачастую микронной и наномикронной крупности. Помимо этого, материал в процессе хранения подвергается гипергенным преобразованиям, в результате которых образуются новые минеральные формы, технологические свойства которых необходимо дополнительно изучать, разрабатывать новые решения для извлечения ценных компонентов. В последние годы вопросам изучения гипергенно-измененных форм минеральной составляющей в техногенном сырье большое внимание уделяется как в нашей стране, так и за рубежом [17–22].

Цель настоящего исследования — изучение вещественного состава материала хвостохранилища, исследование распределения золота в объеме накопителя.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходным сырьем для исследований послужил материал хвостохранилища золотоизвлекательной фабрики одного из предприятий Красноярского края, в котором за годы эксплуатации накоплены хвосты переработки окисленных, смешанных, первичных сульфидных золотосодержащих руд. Складирование хвостов обогащения в хвостохранилище осуществляется с 1996 г. В течении первых пяти лет на фабрике перерабатывали окисленную руду по схеме цианидного выщелачивания. Затем помимо окисленных руд началась отработка сульфидных руд по комбинированной гравитационно-флотационно-биогидрометаллургической технологии. Были периоды, когда в накопитель поступали хвосты обогащения смешанных руд (окисленных и сульфидных). В последнее годы в хвостохранилище направляются хвосты переработки первичных сульфидных руд. Материал для исследований отобран из скважин, пробуренных с ограждающей дамбы хвостохранилища золотоизвлекательной фабрики (рис. 1). Глубина пробуренных скважин составила более 70 м.

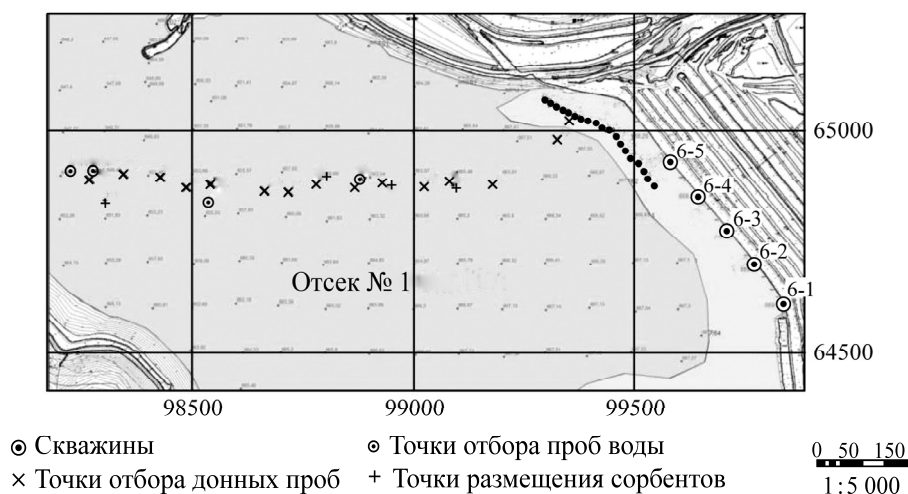


Рис. 1. Карта отбора фактического материала с ограждающей дамбы хвостохранилища

Материал керновых проб объединен в секции по 5 м для последующего комплексного изучения. По результатам изучения керновых проб для дальнейших технологических исследований формировались пробы по типу сырья (сульфидный, смешанный, окисленный).

На рис. 2 показаны уровни заполнения объема хвостохранилища хвостами различного вещественного состава.

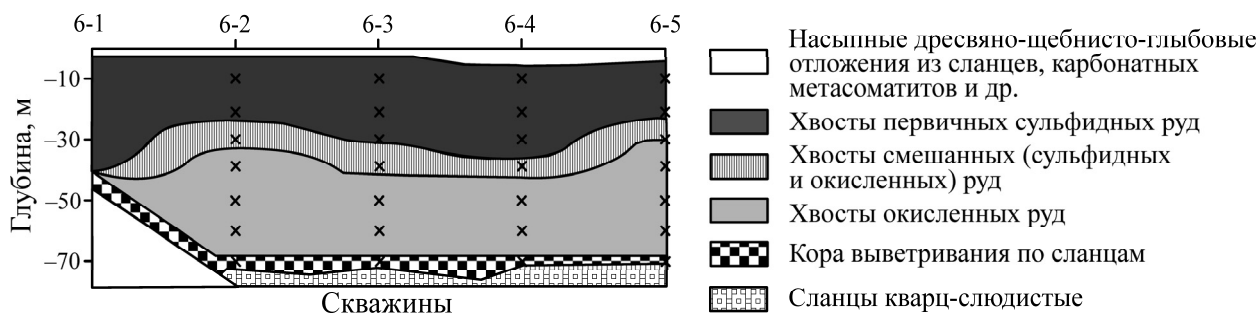


Рис. 2. Геологический разрез по линиям скважин, пробуренных с ограждающей дамбы хвостохранилища (положение скважин на дамбе приведено на рис. 1)

МАТЕРИАЛ И ОБОРУДОВАНИЕ

Химический анализ техногенного сырья выполнен рентгенофлуоресцентным (РСФА) и спектральным (РСА) методами. Анализ продуктивных растворов проводился атомно-эмиссионным спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой. Для определения содержания золота применяли пробирную плавку с атомно-абсорбционным окончанием, рациональный анализ на золото. В минералогических исследованиях использовали микрорентгено-спектральный и оптический методы анализа.

Микроскопические исследования* осуществляли бинокулярным микроскопом ЛОМО МС-1 и микроскопом Axioscope 40 A Pol. Съёмка дифрактограмм выполнена автоматизированным рентгеновским дифрактометром XRD-6000 фирмы Shimadzu (Япония), расчет и расшифровка данных — по стандартной методике с использованием картотеки эталонных порошковых спектров JCPDS. Рентгенофлуоресцентный анализ проводился волновым рентгенофлуоресцентным спектрометром XRF-1800 фирмы Shimadzu (Япония) по стандартной методике — полуколичественный анализ по способу фундаментальных параметров средствами программного обеспечения поставщика оборудования. Электронно-микроскопические исследования и микрорентгеноспектральный анализ выполнены на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM-3000, (Япония) с системой микроанализа Quantax 70 (Bruker, Германия). Образцы перед микроскопическим изучением готовили импрегнированием эпоксидной смолой EpiFix, последовательной обработкой поверхности наждачной бумагой SiC P200-P2000 и корундовыми суспензиями различной крупности с последующей финишной полировкой суспензиями коллоидного кремнезема на шлифовально-полировальном станке TegraPol-15 (Struers, Швейцария).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемый материал хвостохранилища представлен преимущественно тонкодисперсной фракцией, присутствуют отдельные частицы металла техногенного происхождения, обломки горных пород (сланцев), единичные зерна кварца и граната, единичные вторичные сростки пылеватых и песчаных частиц, сцементированные гипсом (хвосты переработки первичных руд) и гидроксидами железа (окисленные хвосты). Цвет варьирует от светло-серого (продукты переработки первичных руд) до светло-бурого (хвосты обогащения окисленных руд). По результатам рентгенофазового анализа породообразующая часть материала хвостов представлена в основном кварцем, слюдами. Кальцит, хлорит, доломит, гипс в большем количестве находятся в хвостах переработки первичных руд, в меньшем — в хвостах переработки окисленных руд (табл. 1). Химический состав изученных проб приведен в табл. 2.

*Электронно-микроскопические исследования выполнены на оборудовании Красноярского регионального центра коллективного пользования СО РАН.

ТАБЛИЦА 1. Минеральный состав породообразующих минералов хвостов по результатам рентгенофазового анализа

Распространенность минералов	Хвосты переработки руд	
	первичных	окисленных
Главные	Кварц (75.9 – 36.0/54.3) мусковит + биотит (29.1 – 8.57/18.3) кальцит (14.8 – 6.6/9.93) хлорит (16.3 – 2.38/10.1)	Кварц (90.4 – 60.0/81.2) мусковит + биотит (17.7 – 5.25/11.83)
Второстепенные	Доломит (3.76 – 0/2.05) альбит (6.7 – 0/2.89) гипс (4.4 – 0.16/1.52)	Кальцит (4.8 – 0/1.15) доломит (0.96 – 0/0.36) хлорит (19.3 – 0/4.1) альбит (3.76 – 0/0.65)
Редкие	Рутил (0.9 – 0.11/0.2)	Шеелит (0.16 – 0/0.01) рутил (0.79 – 0/0.23), гипс (1.6 – 0/0.16)

Примечание. В скобках указаны интервал содержания от максимального до минимального и среднее содержание, %

ТАБЛИЦА 2. Химический состав изученных проб, %

Компонент	Проба		
	сульфидная	смешанная	окисленная
Na ₂ O	0.76	0.54	0.15
MgO	2.04	1.86	0.69
Al ₂ O ₃	9.99	8.38	6.58
K ₂ O	2.49	2.14	1.51
CaO	10.46	10.14	2.11
MnO	0.24	0.24	0.31
SiO ₂	58.28	61.79	80.45
P ₂ O ₅	0.14	0.13	0.09
Fe ₂ O ₃ (общее)	5.35	4.58	4.52
Fe ₂ O ₃ (окисное)	2.17	2.06	4.39
FeO (закисное)	2.86	2.27	0.11
S (общая)	0.64	0.56	0.10
S (сульфидная)	0.46	0.39	0.068
SO ₃ (сульфатная)	0.46	0.42	< 0.25
Sb (окисленная)	0.083	0.088	0.045
Sb (сульфидная)	0.037	0.062	0.23
TiO ₂	0.46	0.38	0.31
п.п.п.	9.24	9.29	3.21

Гипс является новообразованной фазой, не встречающейся в исходных рудах. Он отмечается в хвостах обогащения неокисленных и смешанных руд и почти отсутствует в хвостах окисленных руд (табл. 1). Такое распределение связано как с образованием сульфатной серы при окислении сульфидов, так и с техногенными сульфатами оборотной воды. При электронно-микроскопическом изучении установлено, что гипс образует рыхлые и сплошные каймы и налеты на поверхности различных минеральных фаз, особенно обогащенных кальцием. Чаще всего кайма представлена пылевидными частицами минералов хвостов, сцементированными гипсом.

Для всех проб хвостов характерно снижение содержания кварца в мелких классах крупности и возрастание доли слюды и хлорита. Очевидно, это связано с более высокой устойчивостью кварца к дроблению и истиранию. Напротив, содержание мусковита, биотита и в меньшей степени хлорита увеличивается к мелкому классу крупности.

Основными рудными минералами проб хвостов являются магнетит, пирит, пирротин, арсенопирит, антимонит. Галенит и некоторые первичные минералы сурьмы (джермсонит, гудмундит, бертьерит и ульманнит) встречаются в виде единичных выделений преимущественно в пробах неокисленных хвостов. Обнаружены также вторичные минеральные формы железа, сурьмы, возникшие в результате техногенных преобразований (рис. 3). Из вторичных минералов сурьмы присутствуют валентинит Sb_2O_3 и трипугиит $FeSbO_4$ в виде тонких налетов и корочек, пористых агрегатов, обнаруженные в основном в материале окисленных хвостов.

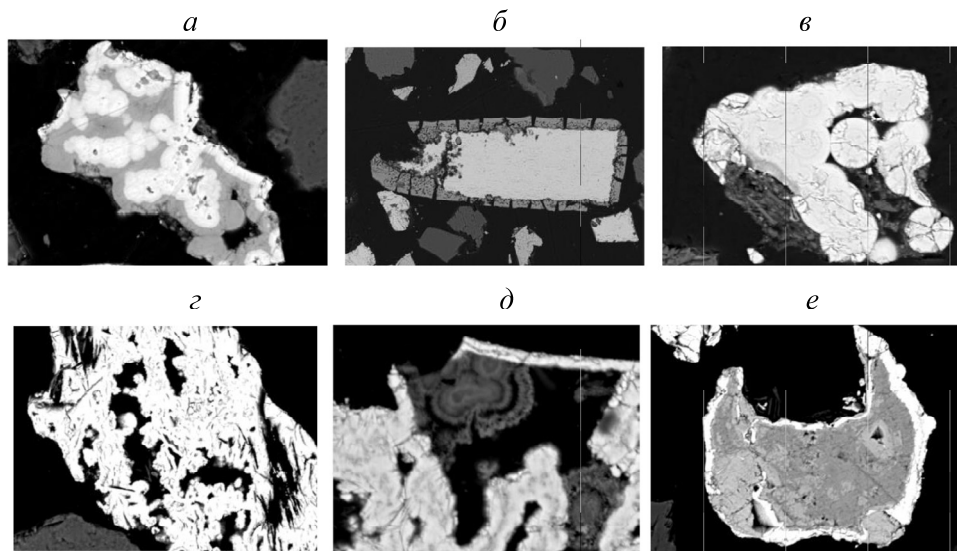


Рис. 3. SEM-изображения вторичных минералов в материале хвостохранилища: *а* — вторичные окислы сурьмы (светло-серое), обрастающие лимонитом (серый); *б* — “рубашка” вторичных минералов (гетит, арсенолит, скородит) вокруг кристалла арсенопирита; *в* — сферолитовые выделения валентинита; *г* — колломорфные выделения трипугиита с отпечатками чешуйчатых силикатов; *д* — гипергенный апатит (тёмно-серый), нарастающий на вторичный трипугиит; *е* — агрегат гетита, обрастающий каймой вторичных оксидов сурьмы и железа (валентинит и трипугиит)

При окислении арсенопирита на поверхности зерен, реже внутри них образуются пленки и скопления скородита, гетита, валентинита и других вторичных минералов (рис. 3б). Характерно практически полное отсутствие серы в продуктах гипергенного минералообразования по арсенопириту.

Анализ распределения содержания золота на разрезе (рис. 4) показывает относительно низкие 0.2–0.4 г/т (среднее 0.292 г/т) его концентрации в нижней части (хвостах переработки окисленных руд) и более высокие — в верхней части разреза — в хвостах переработки смешанных и сульфидных руд 0.70–1.13 г/т (среднее 0.602 г/т). В сульфидных хвостах следует отметить тесную корреляцию золота с серой, мышьяком и углеродом. Для окисленного сырья характерна корреляция золота с сурьмой и вольфрамом. Концентрация этих элементов здесь в 2 раза и более превышает таковые в хвостах переработки первичных руд.

Коэффициент вариации содержания золота по данным опробования скважин составил 50 %. В скважинах 6-3, 6-4, 6-5 отчетливо выделяется горизонт повышенных концентраций золота (>0.7 г/т), совпадающий с горизонтом хвостов смешанного типа — переход от хвостов переработки окисленных руд к первичным (между отметками – 40 и – 20 м). Это косвенно подтверждает нестабильность технологического процесса и относительно повышенные потери металла с хвостами обогащения в период переработки смешанного типа сырья на фабрике.

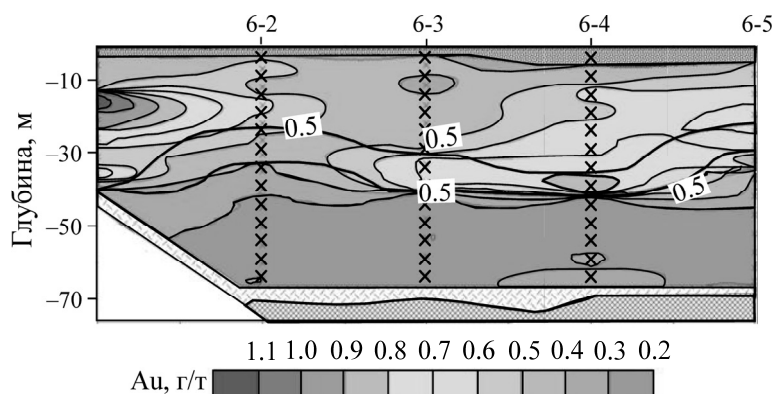


Рис. 4. Характер распределения содержания золота по разрезу хвостов в профиле скважин, пробуренных с ограждающей дамбы

Изучено распределение золота по керновым пробам в крупных классах ($-100+40$ мкм) и в шламовых фракциях (-40 мкм) по разведочному профилю дамбы хвостохранилища (рис. 5). Распределение золота по классам крупности неоднородно. Участки с повышенным содержанием золота (>0.7 г/т) в классе $-100+40$ мкм в хвостах первичных сульфидных руд свидетельствуют о неполном раскрытии металла в процессе переработки, что связано, вероятнее всего, с его тонкой вкрапленностью. Нижние горизонты хвостохранилища, представленные хвостами переработки окисленных руд как в песчаных, так и в шламовых фракциях, обеднены золотом по сравнению с верхними горизонтами.

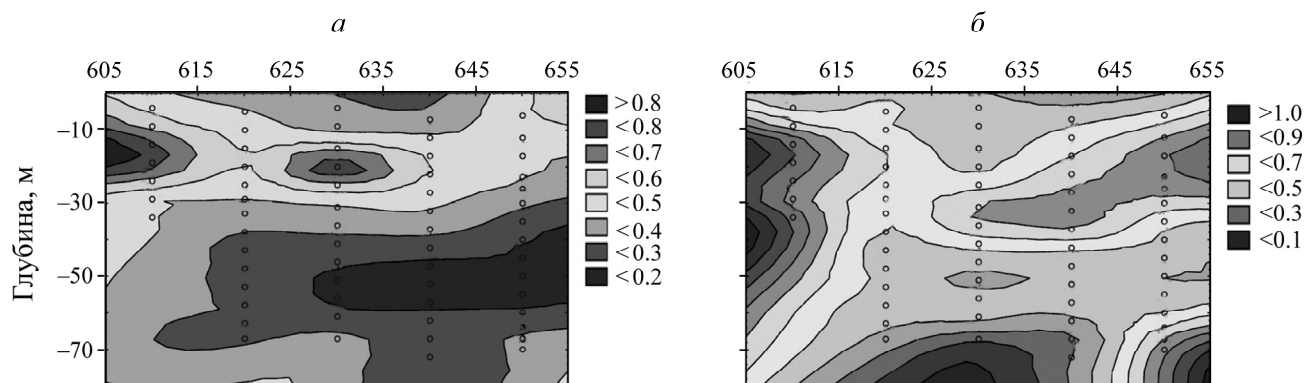


Рис. 5. Карта содержания золота в классе $-100+40$ мкм (а); -40 мкм (б)

В шламовых фракциях участки с повышенным содержанием золота (>0.7 г/т) отмечаются как в окисленном, так с сульфидном и смешанном сырье. Характер изолиний на рис. 4, отражающих распределение содержаний золота по профилю хвостохранилища, свидетельствует о смыве тонких фракций, содержащих в своем составе повышенные содержания металла, вглубь от ограждающей дамбы хвостохранилища.

Рациональный анализ на золото показал, что максимальное количество металла — 56.25 % в цианируемой форме находится в сульфидном материале хвостов. В пробе, характеризующей смешанное сырье, в цианируемой форме присутствует 50 % золота. Из трех проб наиболее труднобогатимый — окисленный материал, где в цианируемой форме сосредоточено всего 33 % (табл. 3). Относительно обогащенным является смешанное сырье, где содержание золота составляет 0.72 г/т. В сульфидном и окисленном материале содержание металла 0.64 и 0.36 г/т соответственно.

ТАБЛИЦА 3. Результаты рационального анализа исследуемых проб

Форма нахождения золота	Содержание золота, г/т			Распределение золота, %		
	Проба					
	сульфидная	смешанная	окисленная	сульфидная	смешанная	окисленная
Свободное и в сростках (извлекаемое цианированием)	0.36	0.36	0.12	56.25	50.0	33.33
Извлекаемое цианированием после обработки солянокислым раствором двуххлористого олова (ассоциированное с оксидами и гидроксидами железа, карбонатами)	0.08	0.08	0.10	12.50	11.11	27.78
Ассоциированное с сульфидами	0.11	0.20	0.05	17.19	27.78	13.89
Тонковкрапленное в породообразующие минералы	0.09	0.08	0.09	14.06	11.11	25.00
Итого	0.64	0.72	0.36	100.00	100.00	100.00

По результатам электронно-микроскопического изучения, золото в материале хвостохранилища находится в тонких сростках в основном с арсенопиритом либо арсенопиритом, замещаемым пирротином. При замещении происходит концентрирование невидимого золота в оставшейся части кристалла арсенопирита и формирование дисперсных его частиц. Повышенное содержание золота в горизонте хвостов переработки первичных руд косвенно указывает на арсенопирит как основной носитель золота в хвостах. Возрастание содержания золота в пробах и фракциях, обогащенных тонкодисперсными (–20 мкм) рентгеноаморфными гидроксидами железа, связано с сорбцией золота на активной поверхности лимонита.

Самородное золото в пробах отмечено в виде единичных проявлений размером менее 0.1 мм в шлиховом материале и в сростании с арсенопиритом, пирротином и цирконом (рис. 6). В тонкодисперсных фракциях наблюдается повышенное содержание золота, связанное с рентгеноаморфными гидроксидами железа.

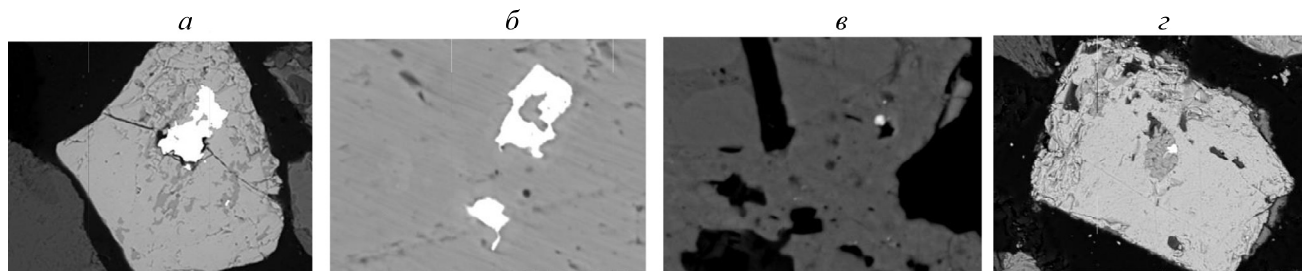


Рис. 6. SEM-изображения частиц золота в материале хвостохранилища: *а* — самородное золото в арсенопирите, замещаемом пиритом: длина частицы около 25 мкм, пробность в интервале 814–891 ‰, содержание ртути 5.21–10.32 мас.%; *б* — самородное золото в арсенопирите. Общая длина агрегата частиц около 14 мкм, пробность варьирует от 911 до 693 ‰; *в* — самородное золото в цирконе: поперечный размер частицы около 1 мкм; *г* — самородное золото в арсенопирите, замещаемом пирротином: поперечный размер частицы около 3 мкм, пробность 934, основная примесь — ртуть

Свободное золото отличается светло-желтым цветом и крючковатой формой. Характерной особенностью золотосодержащего арсенопирита является замещение пирротином. На фронте замещения происходит накопление невидимого золота в арсенопирите и появляются относительно крупные частицы. Пробность золота варьирует от высокой (934) до низкой (693), основная примесь — ртуть, серебро практически отсутствует.

Помимо золота, в материале хвостохранилища в качестве ценных компонентов следует отметить сурьму в виде как первичных, так и вторичных минеральных образований и вольфрам, представленный шеелитом. Максимальные концентрации W и Sb пространственно сопряжены с хвостами переработки окисленных руд.

ВЫВОДЫ

Составлена обобщенная модель распределения золота и сопутствующих элементов по выбранному профилю геологических скважин, дающая общее представление о распределении металлов от поверхности хвостохранилища до его ложа.

Распределение золота и сопутствующих элементов коррелирует с последовательностью отработки и складирования различных типов руд от окисленных к смешанным и далее сульфидным. Для слоя хвостов переработки окисленных руд характерны минимальные концентрации золота (среднее 0.29 г/т) и тесная его пространственная корреляция с сурьмой и вольфрамом. Пробы, отобранные в верхней части разреза, по хвостам переработки смешанных и первичных руд имеют содержание золота в среднем в 2 раза выше, чем по окисленным рудам. Тесную корреляцию с золотом здесь обнаруживают сера, мышьяк и углерод.

Установлено, что для золота свободная форма нахождения не характерна. Металл находится в тонких сростках в основном с арсенопиритом либо арсенопиритом, замещаемым пирротинном.

Сурьмяная минерализация присутствует как в хвостах переработки первичных, так и окисленных руд, тяготея в большей степени к последним. Для хвостов переработки неокисленных руд наиболее характерен антимонит, реже встречаются бертьерит, гудмундит, джемсонит и ульманнит. Для хвостов окисленных руд присущи валентинит и трипугиит; помимо этих фаз, сурьма локализуется в лимоните.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болтыров В. Б., Селезнев С. Г., Стороженко Л. А. Экологические последствия долговременного хранения техногенных объектов типа “Отвалы Аллареченского месторождения” (Печенгский район Мурманской области) // Изв. УГГУ. — 2015. — № 4 (40). — С. 27–34.
2. Маслобоев В. А., Селезнев С. Г., Макаров Д. В., Светлов А. В. Оценка экологической опасности хранения отходов добычи и переработки медно-никелевых руд // ФТПРПИ. — 2014. — № 3. — С. 138–153.
3. Edraki M., Baumgartl T., Manlapig E., Bradshaw D., Franks D. M., and Moran Ch. J. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: a review of alternative approaches, J. Cleaner Prod., 2014, Vol. 84. — P. 411–420.
4. Carmo F. F., Kamino L. H. Y., do Carmo F. F., et al. Fundação tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context, Perspectives in Ecology and Conservation, 2017, Vol. 15, No. 3. — P. 145–151.
5. Гурская Л. И., Снежко О. Н., Васильев С. П., Молчанов А. В. Техногенные месторождения платиновых металлов – новый источник ценного промышленного сырья // Региональная геология и металлогения. — 2016. — № 66. — С. 80–90.
6. Salinas-Rodríguez E., Hernández-Ávila J., Rivera-Landero I., et al. Leaching of silver contained in mining tailings, using sodium thiosulfate: A kinetic study, Hydrometallurgy, 2016, Vol. 160. — P. 6–11.
7. Чернышов Н. М. Техногенный золото-платиноидный тип месторождений КМА (Центральная Россия) // Вестн. ВГУ, серия: Геология. — 2010. — № 1. — С. 175–191.
8. Твердов А. А., Жура А. В., Соколова М. А. Проблемы комплексного использования минерально-сырьевых ресурсов и освоения техногенных месторождений // Рациональное освоение недр. — 2013. — № 5. — С. 16–20.

9. **Мовсисян Р. С., Мкртчян Г. А., Мовсисян А. И.** Перспективы промышленного освоения техногенных минеральных ресурсов Республики Армения // Изв. НАН РА, Науки о земле. — 2014. — Т. 67. — № 1. — С. 30–39.
10. **Ежов А. И.** Оценка техногенного сырья в Российской Федерации (Твердые полезные ископаемые) // Горные науки и технологии. — 2016. — № 4. — С. 62–75.
11. **Иванников С. И., Эпов Д. Г., Крысенко Г. Ф. и др.** Комплексный подход к извлечению золота из техногенных объектов золотодобычи Дальнего Востока России // Вестн. ОНЗ РАН. — 2013. — Т. 5. — NZ1001, DOI: 10.2205/2013NZ000115.
12. **Васильев Е. А., Рудой Г. Н., Савин А. Г.** Перспективы переработки лежалых хвостов обогащения ОАО “Гайский ГОК” // Цв. металлы. — 2014. — № 10. — С. 25–28.
13. **Богданович А. В., Васильев А. М., Шнеерсон Я. М., Плешков М. А.** Извлечение золота из лежалых хвостов обогащения колчеданных медно-цинковых руд // Обогащение руд. — 2013. — № 5. — С. 38–44.
14. **Литвинцев В. С.** О ресурсном потенциале техногенных золотороссыпных месторождений // ФТПРПИ. — 2013. — № 1. — С. 118–126.
15. **Мирзеханов Г. С.** Оценочные критерии ресурсного потенциала техногенных образований россыпных месторождений золота Дальнего Востока России // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. — 2014. — № 1. — С. 139–150.
16. **Александрова Т. Н., Александров А. В., Литвинова Н. М., Богомяков Р. В.** Исследование возможности отработки техногенных отвалов россыпной золотодобычи методами “рудной” технологии // ГИАБ. — 2013. — № 5. — С. 65–69.
17. **Бортникова С. Б., Гаськова О. Л., Бессонова Е. П.** Геохимия техногенных систем. — Новосибирск: Гео, 2006. — 169 с.
18. **Bortnikova S., Bessonova E., and Gaskova O.** Geochemistry of arsenic and metals in stored tailings of a Co–Ni arsenide-ore, Khovu-Aksy area, Russia, Appl. Geochem., 2012, Vol. 27, No. 11. — P. 2238–2250.
19. **Craw D.** Geochemical changes in mine tailings during a transition to pressure – oxidation process discharge, Macraes mine, New Zealand, J. Geochem. Exploration, 2003, Vol. 80, No. 1. — P. 81–94.
20. **Smuda J., Dold B., Jorge E. Spangenberg, Friese K., Kobek Max R., Carlos A. Bustos, Hans-Rudolf Pfeifer.** Element cycling during the transition from alkaline to acidic environment in an active porphyry copper tailings impoundment, Chuquicamata, Chile, J. Geochem. Exploration, 2014, Vol. 140. — P. 23–40.
21. **Lindsay M. B. J., Moncur M. C., Bain J. G. et al.** Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings, Appl. Geochem., 2015, Vol. 57. — P. 157–177.
22. **Jackson L. M., Parbhakar-Fox A.** Mineralogical and geochemical characterization of the Old Tailings Dam, Australia: Evaluating the effectiveness of a water cover for long-term AMD control, Appl. Geochem., 2016, Vol. 68. — P. 64–78.

Поступила в редакцию 15/VI 2018

После доработки 27/XI 2018

Принята к публикации 29/I 2019