

П. В. Казаков

К ВЫБОРУ РАЦИОНАЛЬНОГО СПОСОБА ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННОГО ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Выбор оптимальных способов извлечения золота и серебра из отвальных хвостов обогатительных фабрик (ОФ), перерабатывающих руды комплексных медноколчеданных, золоторудных месторождений и зон их окисления («железные шляпы»), предопределен минеральными формами их нахождения и распределения по минеральным фазам и ассоциациям, а также степенью окисления сульфидов старогодних хвостов обогащения в условиях повышенных обводненности или аэрации.

Рациональные способы переработки старогодних отвальных хвостов рассмотрим на примере изучения их на хвостохранилищах ОАО «Учалинский горно-обогатительный комбинат» (УГОК), ОАО «Башкирский медно-серный комбинат» (БМСК) и Миндякской золото-извлекательной фабрики (ЗИФ).

По данным последних исследований [Викентьев и др., 2010; Викентьев, 2012], в первичных рудах Учалинского медно-цинковоколчеданного месторождения содержание свободного золота составляет 3–4%, в сростках — 10–12%, тонкодисперсного «упорного» в сульфидах — около 85%, чем обусловлены значительные (до 29%) потери золота в хвостах флотационного обогащения. Основная часть золота и серебра находится в рассеянном состоянии в сульфидах (сфалерите, пирите, халькопирите). Содержание золота в сфалерите в среднем 1,3 г/т (до 3 г/т), серебра — от 20 до 75 г/т; золота в пирите в среднем 1,2 г/т (до 1,6 г/т), серебра 9,5 г/т (до 30 г/т); минимальные концентрации золота (десятые доли г/т) и серебра (от 10 до 20 г/т) установлены в халькопирите. Концентрацию этих металлов определяют самородное золото, сульфиды (в основном петровскит, аргентит), теллуриды (гессит, эмпрессит, калаверит), и сульфосоли серебра (серебро-теннантит-тетраэдрит и серебро-тетраэдрит с 7–8% серебра, пирсеит). Самородное золото размером 5–30 мкм, низкопробное, содержит ртуть до 11,3 мас. % и располагается на поверхности и в трещинах кристаллов пирита. Главные концентраторы серебра — блеклая руда, реже борнит, второстепенные — теллуриды и др. Доля ионного золота, связанного в виде изоморфной примеси в основных сульфидах, а также в виде золото-серебряных теллуридов и др. соединений, установлена (термохимическим методом) в количестве 38% в пробах цинково-медной руды (с концентрацией золота 2,2 г/т) и медного концентрата из цинково-медной руды (1,8 г/т золота).

Среди установленных в рудах ЭПГ резко преобладает платина. Наибольшие содержания платины (до 1,96 г/т) установлены в существенно пиритовых фракциях, уходящих в хвосты; им соответствуют повышенные содержания палладия и иридия (до 0,025 и 0,019 г/т соответственно). Значительные содержания платины (0,46 и 0,55 г/т) определены также в цинковом (0,55 г/т) и коллективном медно-цинковом (0,46 г/т) концентратах.

Изучение вещественного состава перерабатываемых руд, выполненные рациональные анализы на золото по продуктам обогащения показали практически полное отсутствие свободного золота и, что определенная часть пирита более золотоносна. В частности таковым является медно-пиритный продукт, получаемый при доводке грубого цинкового концентрата в узле обезмеднения и обезжелезнения и представляющий собой тонко измельченный материал с ситовой характеристикой 92–97% класса менее 0,044 мм. Представлен он сростками медных минералов и сфалерита в пирите размером 2–20 мкм и содержит 2,4–2,6 г/т золота, 65–75 г/т серебра, которые большей частью связаны с пиритом. Лабораторные исследования медно-пиритного продукта, концентрирующего в себе благородные металлы, позволили рекомендовать для промышленного внедрения схему его доводки в отдельном цикле. Внедрение на фабрике схемы, учитывающей генезис золота, позволило стабилизировать извлечение благородных металлов. Следует заметить, что на низкий уровень извлечения благородных металлов существенное влияние также оказывает загрубление рудного помола (80–82% класса менее 0,74 мм вместо 96% по проекту) [Азов, 2004].

По данным работ тематической партии ГУП УКГЭ «Уралзолоторазведка» [Фаткуллин, 2002ф], изучение гранулометрического состава, минерального состава, состава основных и попутных полезных компонентов (таблицы 1–3) и исследования с применением рациональных способов переработки хвостов Учалинской ОФ проводились УГОКом, ОАО «Институт Унипромедь», ОАО «Уралмеханобр» и другими организациями.

Так, Институтом электрофизики (ИЭФ) Уральского отделения РАН (г. Екатеринбург) разработана **технология комплексной переработки хвостов Учалинской ОФ** с извлечением благородных и цветных металлов [Котов и др., 1999]. Для раскрытия эмульсионно-вкрапленного золота в пирите применен

Таблица 1
Гранулометрический состав отвальных хвостов Учалинской ОФ¹

Фракция (мм)	Содержание, %
+0,14	6,0
-0,14 +0,1	7,0
-0,1 +0,074	2,0
-0,074 +0,044	7,0
-0,044	78,0

Примечание: ¹ — анализы УГОК (1989 г.).

Таблица 2
Минеральный состав отвальных хвостов Учалинской ОФ¹

Группа минералов	Минерал	Содержание, %
Рудные	Пирит	57,0
	Сфалерит	1,1
	Халькопирит	0,8
	Борнит	0,1
	Ковеллин	0,1
	Оксиды железа	2,0
Породообразующие, в т.ч.	Кварц	38,9
	Полевые шпаты	
	Серицит	
	Барит	
	Хлорит	
	Кальцит	

Примечание: ¹ — анализы УГОК (1999 г.).

принципиально новый способ — воздействие в воде на сырье мощными (4×10^8 Вт) электрическими импульсами наносекундной длительности (10^{-9} с) частотой 500 Гц. Импульсное воздействие незначительно изменяет ситовую характеристику хвостов, но при этом существенно возрастает извлечение золота — 71% (через 15 сек обработки), что свидетельствует о высокой селективности предложенного метода дезинтеграции. Затраты энергии для раскрытия 1 г золота из пиритных хвостов — не более 3 кВт час.

Электроимпульсная обработка хвостов при энергии разряда в импульсе около 1 Дж стимулирует процессы окисления сульфидов: извлечение в раствор цинка и железа возрастает в 2 раза, меди на 20% (при соотношении Ж:Т = 1:1). Скорость последующего выщелачивания меди и цинка 5-процентным раствором серной кислоты из хвостов в 2 раза выше в сравнении с обычной. Кучным выщелачиванием в продуктивный раствор извлекается до 40% меди и 70% цинка. Технологическая схема переработки включает: электроимпульсную обработку, выщелачивание меди и цинка, промывку и выщелачивание золота любым растворителем.

Таблица 3
Содержание основных и попутных полезных компонентов в отвальных хвостах Учалинской ОФ¹

Элементы	Ед. изм.	Содержание
Медь	%	0,30
Цинк	%	0,61
Сера	%	32,23
Золото	г/т	1,29
Серебро	г/т	19,02
Платина ²	г/т	0,55
Кадмий	%	0,0028
Селен	%	0,0047
Теллур	%	0,0054
Индий	%	0,00045
Стронций	%	0,0033
Свинец	%	0,11
Марганец	%	0,04
Кобальт	%	0,006
Никель	%	0,006
Хром	%	0,008
Железо	%	27,5
Мышьяк ³	%	0,15
Сурьма ³	%	0,004
Ртуть ³	г/т	2,9

Примечания: ¹ — анализы УГОК (2000 г.); ² — анализы ИГ УНЦ РАН (2001 г.); ³ — вредные технологические и токсичные элементы.

В настоящее время одним из перспективных и динамично развивающихся способов извлечения цветных и благородных металлов является **биогидрометаллургия**. Он основан на использовании установленного факта участия в окислительных процессах железо- и сероокисляющих бактерий рода *Thiobacillus ferrooxidans* (Th. f.). Известно, что сообщество бактерий интенсифицирует окислительные процессы в рудной массе при наличии в ней кислорода, влаги, солей азота, фосфора, двуокиси углерода и других компонентов среды.

Следовательно, созданием оптимальных условий среды в слое отвальных хвостов обогащения колчеданных руд можно интенсифицировать скорости окисления и новообразования минералов в нужном направлении, а именно: в направлении вскрытия эмульсионно-вкрапленных в сульфиды, преимущественно в пирит, благородных металлов. Вскрытые из сульфидов золото и серебро переходят в другие формы нахождения, преимущественно в сростковую, покрытую пленками, частью в свободную, которые уже легче поддаются гидрометаллургическому процессу растворения. Ряд проведенных исследований указывает на целесообразность

использования для биовыщелачивания также кислых шахтных вод, содержащих бактерии *Th. f.* Важным моментом биогидрометаллургической технологии является ее экологичность.

По данной технологии перерабатываются легялые хвосты предприятия Голд Флокс (ЮАР) с содержанием золота 0,2–0,65 г/т, хвосты флотационного обогащения сульфидных руд на предприятии Эквити Силвер Майнз Лтд (Канада) с содержанием золота 0,5–0,9 г/т, проведены полупромышленные испытания и получены положительные результаты переработки концентратов Тасеевской ЗИФ комбината «Балейзолото» [Лодейщиков, 1999].

Технология переработки хвостов Учалинской ОФ методом кучного бактериально-химического выщелачивания разработана ОАО «Институт Унипромедь» [Павличенко, 1998ф]. Схема переработки включает: биохимическое сернокислотное окисление сырья в отвале; выщелачивание цветных металлов из биоокисленного материала отмывкой подкисленной водой непосредственно в отвале и сбором продуктивного раствора для выделения из него меди и цинка; чановое (агитационное) цианирование отмытого кека с последующим ситовым разделением пульпы; осаждение драгметаллов из продуктивных растворов активированным углем; цианидную десорбцию драгметаллов с угля; электроэкстракцию золота и серебра; гипохлоритное обезвреживание кека.

Для окисления сульфидной составляющей хвостов используется культура бактерий *Th. f.*, предварительно адаптированная к хвостам Учалинской ОФ в течение месяца. Биоокисление предусматривает смачивание, рыхление и первичное закисление сырья (расход H_2SO_4 — 1 г/кг хвостов), а также последующее рыхление и увлажнение отвала — 2 раза в неделю водой или биораствором (с концентрацией клеток — 107 кл/мл). Клетки *Th. f.* культивируются на среде 9К без железа с добавками пиритных хвостов. Извлечение металлов по данной схеме составляет: золота — 46%, серебра — 50%, меди — 72%, цинка — 72%. По мнению разработчиков технологии при более продолжительном периоде биоокисления хвостов в отвале степень извлечения благородных металлов будет выше и может подняться на уровень 50–60% в сезон. Выполненная укрупненная технико-экономическая оценка схемы показывает, что при переработке 1 млн т хвостов в год может быть получено золота 680 кг, серебра — 8,56 т, цветных металлов в концентрате: меди — 1360 т, цинка — 6260 т. Рентабельность к себестоимости продукции — 50%, окупаемость капитальных вложений менее года.

ОАО «Уралмеханобр» также разработана **технология извлечения золота из сульфидных руд и отходов**

обогащения с использованием электрических сепараторов (патенты №№ 2008976 и 1577148, авторы Урванцев А.И. и др.). Предлагаемая технология дала положительные результаты при тестовых испытаниях на хвостах Учалинской ОФ.

Для хвостов флотационного обогащения УГОК наиболее перспективны технологии биоокисления и электроимпульсная.

Колчеданные руды Сибайского месторождения представлены следующими промышленными сортами: серноколчеданные, медно-пирротиновые, медные, медно-цинковые с преобладанием последних. Основные рудные минералы: пирит, сфалерит, халькопирит, пирротин, ковеллин, борнит, халькозин. Из нерудных наиболее распространены кварц, кальцит, хлорит, серицит. Среднее содержание полезных компонентов в рудах: медь — 1,14%, цинк — 2,8%, сера — 41,1%, золото — 0,68 г/т, серебро — 6,19 г/т, кадмий — 9 г/т, индий — 4,5 г/т, кобальт — 67 г/т, селен — 83 г/т, теллур — 47 г/т, германий — 3 г/т, галлий — 6 г/т, платиноиды — 0,2 г/т.

Формы нахождения золота: эмульсионно-вкрапленное в сульфиды — 75–80%, в сростках с породой и сульфидами — 7–13%, покрытое пленками гидроокислов железа и карбонатов — 2–10%, свободное — 2–9%. Хвосты Сибайской ОФ также являются весьма упорным сырьем в отношении извлечения благородных металлов и требуют специальных операций для их вскрытия и извлечения. Складированы они в двух хвостохранилищах: старогоднем, эксплуатировавшемся в 1959–1965 гг., и действующим с 1966 г. Вещественный и гранулометрический состав их представлен в таблицах 4–6.

При минералогическом картировании старогоднего хвостохранилища установлены процессы вторичного минералообразования в верхних слоях отложений с разложением первичных сульфидов и образованием сульфатов (ярозита, розенита и др.).

Таблица 4

Гранулометрический состав отвальных хвостов Сибайской ОФ

Фракция (мм)	Содержание, %	
	Старогодние 1959–1965 гг. ¹	Старогодние с 1966 г. ²
+0,074	8,1	0,8
–0,074 +0,044	17,1	4,8
–0,044 +0,028	8,5	20,4
–0,028 +0,014	23,5	34,8
–0,014 +0,007	23,0	12,3
–0,007	19,8	26,9

Примечания: ¹ — анализы Унипромедь (1995 г.); ² — анализы БМСК (1999 г.).

Таблица 5
 Минеральный состав отвальных хвостов
 Сибайской ОФ

Группа минералов	Минерал	Содержание, %	
		Старогодние 1959–1965 гг. ¹	Старогодние с 1966 г. ²
Рудные	Пирит	60,0	69,8
	Халькопирит	0,6	0,55
	Сфалерит	0,7	0,72
	Сульфаты железа	2,5	—
Породообразующие	Кварц	25	28,9
	Гипс	7	
	Полевой шпат	4,2	

Примечания: ¹ — анализы Института минералогии УРО РАН (1991 г.); ² — анализы БМСК (2000 г.).

Таблица 6
 Содержание основных и попутных
 полезных компонентов в отвальных
 хвостах Сибайской ОФ

Элемент	Ед. изм.	Содержание	
		Старогодние 1959–1965 гг. ¹	Старогодние с 1966 г. ²
Медь	%	0,18	0,20
Цинк	%	0,55	0,48
Сера	%	25,4	37,9
Кадмий	%	0,02	0,0069
Индий	%	0,00038	0,00036
Селен	%	0,0029	0,0029
Теллур	%	0,0038	0,0024
Кобальт	%	0,00628	0,0082
Галлий	%	0,0013	0,0012
Германий	%	0,0001	0,0002
Золото	г/т	1,0	1,0
Серебро	г/т	13,3	8,2
Платина ³	г/т	0,97	0,97
Железо	%	26,7	33,5
Мышьяк ⁴	%	0,03–0,17	0,03–0,17

Примечания: ¹ — анализы БМСК (1981 г.); ² — анализы БМСК (2001 г.); ³ — анализы ИГ УНЦ РАН (2001 г.); ⁴ — вредные технологические и токсичные элементы.

В зоне аэрации на глубинах 1–2 м содержание пирита снизилось до 30–40%, на поверхности — до 5–7% или он полностью разложился [Кораблев, 1991ф].

Интенсификация биоокисления непосредственно в отвале приводит к явным изменениям фазового состава соединений тяжелых металлов, что существенно влияет на переход золота в растворимые формы. Выщелачивание биоокисленных в отвале хвостов позволяет получить растворы, при-

годные для выделения из них цинка и меди в продукты дешевыми методами; из кеков выщелачивания после вывода растворимых сульфатных соединений цианированием извлекается золото и серебро.

Сквозное извлечение металлов за 4-месячный цикл составляет: меди — 39–40%, цинка — 40%, золота — 74,3%, серебра — до 80%. Полученные результаты подтверждены промышленными опытами на пилотной установке БМСК в 1995 г. [Шевелева, 1995ф; Павличенко, 1995ф].

Принципиальная технологическая схема аналогична схеме, разработанной для хвостов УГОКа.

Выполненная технико-экономическая оценка показывает, что при переработке 1 млн т хвостов в год может быть получено 708 кг золота, 7792 кг серебра и цветных металлов в концентрате: меди — 760 т, цинка — 2050 т.

Переработку хвостов по данной технологии можно производить непосредственно в хвостохранилищах БМСК без отсыпки специальных площадок. Это уменьшает капиталовложения в проект утилизации хвостов и повышает эффективность способа [Биишев, 2000].

Непрерывность процесса слоевого формирования массива, пригодного для переработки, достигается за счет соответствия толщины обрабатываемого слоя скорости биоокисления пиритных хвостов и последовательным выполнением сезонных операций: окисления хвостов, промывки их с извлечением меди и цинка, отгрузки хвостов в виде золотосодержащего кека на 3-х технологических картах.

На старогодних хвостах Миндякской ЗИФ на основании испытаний, проведенных ООО «Техника и Технология Дезинтеграции» (г. Санкт-Петербург) в 2003 г., разработана и предложена к реализации следующая схема переработки. Исходный материал (вещественный и гранулометрический состав приведен в таблицах 7–9) загружается в приемный бункер, установленный над грохотом — питателем. На грохоте отсеивается фракция +8 мм (отбивается каменный материал, мусор и т.д.). Подрешетный продукт –8 мм направляется в зумпф, откуда насосом под давлением подается в гидравлический интегратор для размыва глинистой фракции. Гидроциклон, работающий в паре с дезинтегратором, обеспечивает равномерность подачи и требуемую плотность питания, поступающего на основную отсадку. Концентрат основной отсадки является готовым продуктом. Золото из него может быть извлечено, например, цианированием после тонкого измельчения. Кроме того, он может непосредственно быть отправлен на один из заводов цветной металлургии для извлечения полезных компонентов.

Таблица 7
Гранулометрический состав отвальных хвостов Миндякской ОФ¹

Фракция (мм)	Содержание, %
+0,84	4,65
–0,84 +0,42	10,00
–0,42 +0,20	8,50
–0,20 +0,074	23,85
–0,074 +0,05	9,5
–0,05 +0,025	18,00
–0,025 +0,012	12,00
–0,012 +0,006	6,00
–0,006	7,50

Примечание: ¹ — анализы Миндякского рудника (2000 г.).

Таблица 8
Минеральный состав отвальных хвостов Миндякской ОФ¹

Группа минералов	Минерал	Содержание, %
Рудные	Пирит	1,0
	Гидроокислы железа	5,0
Породо-образующие	Хлорит	43,0
	Доломит	23,0
	Кальцит	10,0
	Кварц	8,0
	Серицит	5,0
	Прочие	5,0

Примечание: ¹ — анализы Миндякского рудника (2000 г.).

Таблица 9
Содержание основных и попутных полезных компонентов в отвальных хвостах Миндякской ОФ¹

Элементы и соединения	Ед. изм.	Содержание
Золото	г/т	0,9
Серебро	г/т	0,62
Мышьяк ²	%	0,06

Примечания: ¹ — анализы Миндякского рудника (2000 г.); ² — вредные технологические и токсичные элементы.

Хвосты основной отсадки обезвоживаются в спиральном классификаторе и поступают на контрольную операцию. Концентрат контрольной отсадки возвращается в головной зумпф. Хвосты контрольной отсадки являются отвальными, и после обезвоживания и обесшламливания в спиральном классификаторе могут служить сырьем для строительной промышленности.

Сливы обоих классификаторов через зумпф насосом подаются в систему короткофокусных обогатительных гидроциклонов, где происходит улавливание тонкого золота с возвратом его в одну из отсадочных машин. Шламы, выведенные со сливами короткоконусных гидроциклонов, сгущаются в пластинчатом сгустителе и направляются в отвал. Осветленная вода из сгустителя используется как оборотная в технологическом процессе.

Как показали проведенные испытания, данная схема обеспечит извлечение золота из лежалых хвостов в концентрат с содержанием не менее 80 г/т на уровне 65–70%.

Кроме того, ООО «Екатеринбургская промышленная группа» проведено технологическое тестирование пробы хвостов обогащения на возможность извлечения золота гидрохлоридным выщелачиванием. По результатам испытаний извлечение золота из хвостов обогащения на уровне 70%.

Таким образом, незначительное (2–9%) присутствие свободного (гравитационного) золота в комплексных рудах и отвальных хвостах их флотационного обогащения и нахождение его, большей частью в виде тонкодисперсного «упорного» (до 85%) золота, в том числе ионного (до 38%), связанного в виде изоморфной примеси в основных сульфидах, требуют высокой степени измельчения для обеспечения селективности минералов и обуславливают необходимость применения нетрадиционных способов вскрытия и извлечения золота, таких как биогидрометаллургия, электроимпульсная обработка хвостов, электрическая сепарация и др. В отвальных хвостах ОФ, перерабатывавших золото-кварцевые, золото-сульфидные руды, руды зон окисления (железные шляпы), несущих в значительных количествах свободное золото, наиболее рациональным является применение короткофокусных гидроциклонов и гидрохлоридного выщелачивания. Но при этом также требуется доизмельчение псаммитовой фракции (+0,2 мм) эффелей. По данным технологических исследований Березовской лаборатории (пробы 354-3, 354-47) отвальных хвостов Семеновской ЗИФ установлено, что от 29,2 до 57,2% золота теряется с классом +0,2 мм.

Вовлечение техногенного золотосодержащего сырья в повторную переработку с применением новейших отечественных и зарубежных технологий является одним из основных путей рационального природопользования, и в первую очередь комплексного использования минерального сырья при обеспечении высокого уровня экологической безопасности, а также повышения экономической эффективности работы горнорудной промышленности Южного Урала.

Литература:

Азов Г.Ф. Комплексное использование минерального сырья на ОАО «Учалинский ГОК» // Изв. Вузов. Горный журнал. – 2004. – № 3. – С. 26–30.

Бишев Л.З. Разработка эффективной технологии открытой отработки пиритсодержащих хвостохранилищ: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Челябинск, 2000. – 28 с.

Викентьев И.В. Формы нахождения благородных металлов в колчеданных рудах Урала // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: Матер. IX Межрег. науч.-практ. конф. Уфа, 19–22 ноября, 2012 г. – Уфа: ДизайнПресс, 2012. – С. 120–122.

Викентьев И.В., Молошаг В.П., Шишаква Л.Н. и др. Формы нахождения благородных металлов в колчеданных

рудах Урала // Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований: Мат-лы конф., посвящ. 100-летию Н.В. Петровской. – М.: ИГЕМ РАН, 2010. – Т. 1. – С. 230–237.

Котов Ю.А., Филатов А.Л., Корнежевский С.Р. и др. Комплексная переработка золотосодержащих пиритных хвостов Учалинской обогатительной фабрики // Матер. международ. науч.-техн. конф. «Проблемы геологии и разведки месторождений золота, извлечения благородных металлов из руд и отходов производства». – Екатеринбург, 1999. – С. 90–91.

Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: В 2 т. – Иркутск: Изд-во Иргиредмет, 1999. – Т. 2. – 452 с.