

УДК 622.7

ИССЛЕДОВАНИЕ НА ОБОГАТИМОСТЬ ФЛОТАЦИОННЫМ МЕТОДОМ
ЛЕЖАЛЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ ХВОСТОВ

В. И. Брагин^{1,2}, Е. А. Бурдакова^{1,2}, А. А. Кондратьева¹,
А. А. Плотникова^{1,2}, И. И. Бакшеева¹

¹Сибирский федеральный университет,

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

²Институт химии и химической технологии СО РАН,
ул. Академгородок, 50/24, 660036, г. Красноярск, Россия

Представлены результаты исследований на обогатимость флотационным методом лежалых золотосодержащих хвостов обогатительной фабрики. Сложный вещественный состав и технологические особенности техногенного сырья обусловлены как переработкой руд различных типов на фабрике (сульфидных, окисленных и смешанных) с соответствующими отличиями в технологиях извлечения, так и с протеканием гипергенных процессов в хвостохранилище. Обсуждается возможность вовлечения хвостов в переработку за счет их перефлотации. Установлено, что с применением непродолжительного механического активирования материала хвостов в мельнице и последующей флотации (с корректировкой реагентного режима относительно фабричного) возможно извлечение от 29.0 до 45.4 % золота во флотоконцентрат, при этом достигается отвальное содержание металла в хвостах на уровне 0.2–0.3 г/т.

Флотационный метод обогащения, лежалые хвосты, техногенное минеральное сырье, реагентный режим флотации, извлечение, хвостохранилища, исследование на обогатимость

DOI: 10.15372/FTPRPI20180417

На долю горнодобывающей отрасли промышленности России приходится более 12 млрд т отходов. Подсчет отходов черной и цветной металлургии в объемных показателях достигает более 210 млн м³ в год в виде твердых горных пород, хвостов обогащения — более 140 млн м³ ежегодно [1]. Вопрос о повторном использовании отвалов горно-обогатительных комбинатов требует решения не только в связи с расширением минерально-сырьевой базы предприятий, но и имеет важное значение для обеспечения экологической безопасности страны [2–5].

Примером накопления отвалов служат хвостохранилища “Мусин Лог”, фабрики им. Артема (г. Пласт); Артемовской ЗИФ (Красноярский край); Полярнинского ГОКа (Чукотка); фабрики им. Белова (Магаданская обл.), Балахчинской фабрики (Хакасия) и др.

На одной из обогатительных фабрик на протяжении более чем 20 лет складировались хвосты флотации и гидрометаллургии, сформированные при переработке различных типов золотых руд как первичных, так и окисленных (нескольких месторождений). Среднее содержание в хвостах в различные годы переработки варьирует от 1.2 до 0.4 г/т.

К настоящему моменту хвостохранилище представляет собой крупнейший техногенный золотосодержащий объект с запасами свыше 76 млн т, сопоставимый по запасам со средним золоторудным месторождением. Помимо золота, в хвостах предприятия также концентрируются серебро, сурьма и вольфрам.

МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Цель настоящих исследований — изучение вещественного состава и физических свойств материала хвостов, а также проведение испытаний на обогатимость флотацией на малых технологических пробах, сформированных при отборе керновых проб, пробуренных с ограждающей дамбы хвостохранилища.

Для исследования содержания золота в лежалых хвостах применялся пробирный метод анализа с атомно-абсорбционным окончанием. Изучение вещественного состава осуществлялось рентгенофазовым анализом в совокупности с данными рентгенфлюоресцентного анализа. Для рентгенофазового анализа использовался дифрактометр XRD-6000 (Shimadzu), для рентгенофлюоресцентного анализа — аппарат MobiLAB X-50 (Olympus Innov-X). Расшифровка данных велась на базе картотеки эталонных порошковых спектров JCPDS.

Микроскопические исследования выполняли лабораторными поляризационным аппаратом Axioscope 40A Pol (Carl Zeiss). Исследованию подвергали препараты, подготовленные выделением тяжелой фракции из хвостов на концентрационном столе Gemeni GT60.

Для подготовки и изготовления прозрачно-полированных шлифов использовали следующие материалы и оборудование: эпоксидная смола EpoFix для импрегнирования образцов, шлифовально-полировальный станок TegraPol-15 (Struers).

Исследования на обогатимость флотационным методом проводили по схеме, включающей основную, перечистную и контрольную операции. Процесс флотации осуществляли на флотомашине механического типа с вместимостью камер 3 л (240 ФЛ-А) в основной и контрольной операции для получения пенных продуктов, пригодных по массе для анализа на золото ($T:Ж = 1:2$). Перечистку выполняли на флотомашине 237 ФЛ-А с объемом камеры 0.5 л. Флотацию вели до истощения пенного слоя.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам пробирного анализа и оценки распределения золота по разрезу хвостов в профиле скважин, пробуренных с ограждающей дамбы хвостохранилища, обнаружены относительно низкие 0.2–0.4 г/т его содержания в нижней части (хвостах переработки окисленных руд) и более высокие концентрации в верхней части разреза — в хвостах переработки смешанных и сульфидных руд 0.70–1.13 г/т. Для проведения исследований на обогатимость сформированы три технологические пробы: проба 1 — сульфидная (с содержанием 0.57 г/т), проба 2 — смешанная (0.61 г/т), проба 3 — окисленная (0.30 г/т).

Изучаемый материал хвостов представлял собой тонкодисперсную фракцию с включением обломков горных пород, прежде всего, сланцев. Установлено присутствие единичных зерен граната. В некоторых случаях наблюдались вторичные сростки песчаных частиц, сцементированные гипсом или гидроокислами железа (хвосты первичных и окисленных проб хвостов соответственно). Визуально пробы также отличались: охристый цвет и бурые оттенки были характерны для хвостов обогащения окисленных руд.

Рудная минерализация проб хвостов представлена магнетитом, пиритом, пирротинном, арсенопиритом, антимонитом. В пробах хвостов от переработки сульфидных руд отмечено присутствие галенита и некоторых первичных минералов сурьмы (джерсонит, гудмундит, бертьерит и ульманнит). Лимонит широко распространен в материале окисленных хвостов. Среди нерудных минералов наибольшее распространение получил кварц (на его долю приходится от 50.28 до 80.45 % в зависимости от пробы), кальцит и клинохлор, присутствует глинистая составляющая.

Химический анализ показал, что основные различия между материалом проб заключаются в содержании золота, кальция и углерода. К примеру, химический состав пробы 1 показал наличие: Au — 0.56 г/т, Ag < 0.1 г/т, As — 0.18 %, Sb — 0.11 %, S_{общ} — 0.73 %, Fe — 3.46 %, Ca — 6.88 %, C — 2.48 %. Содержание тех же элементов в пробе 3 соответственно 0.34 г/т, 0.12 г/т, 0.16 %, 0.14 %, 0.83 %, 3.00 %, 1.35 %, 0.50 %.

Самородное золото в пробах обнаружено в виде единичных проявлений размером менее 0.1 мм в шлиховом материале и в сростании с арсенопиритом, пирротинном и цирконом. Свободное золото, найденное в тяжелой фракции хвостов при бинокулярном изучении, отличается светло-желтым цветом и крючковатой формой. Характерной особенностью золотосодержащего арсенопирита является замещение пирротинном: очевидно, 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.

Рациональный анализ технологических проб хвостов показал, что максимальное количество металла — 56.25 % в цианируемой форме находится в пробе 1. В пробе, характеризующей смешанное сырье, в цианируемой форме присутствует примерно 50 % золота. Из всех трех проб наиболее труднообогатимой является проба 3, где в цианируемой форме сосредоточено всего 33 %. Практикой обогащения установлено [6–12], что извлечение золота из отвалов цианированием не превышает 30–40 %, перефлотацией — 20–60 %, гравитацией — 10–20 %.

Для обогащения флотацией хвосты обогатительных фабрик являются сложным объектом. Технологическая упорность при вовлечении в переработку лежалых хвостов связана со значительным содержанием водорастворимых солей, флотационных реагентов, смазочных масел и т. д. Однако, как и для руд, переработка флотацией связана с необходимостью извлечения в пенный продукт как самородного золота, так и сульфидов, содержащих благородные металлы, которые, находясь в известково-цианистой среде, сильно задепрессированы. Во многих работах отмечено, что в процессе хранения частички цементировались [13].

Несмотря на вышеуказанное, флотационный метод обогащения при переработке лежалых хвостов позволяет получать наиболее высокие технологические показатели обогащения, причем для флотации золота из руд и лежалых хвостов используют обширный набор реагентов [14]. Для гидрофобизации поверхности минералов рекомендуются короткоцепочные ксантогенаты, диалкилдитиофосфаты, амины, меркаптобензотиазол и его производные индивидуально и в различных сочетаниях. В отечественной практике флотации золотосодержащего сырья наибольшее распространение получил бутиловый ксантогенат. Имеется положительный отечественный и зарубежный опыт перефлотации хвостов, содержащих благородные металлы [3, 15–18].

При флотации хвостов цианирования предложено два мероприятия — флотировать в щелочной (содовой), а также в кислой среде [7]. В первом случае хвосты тщательно отмывают от цианида и извести, сульфиды активируют медным купоросом и флотируют в содовой среде с использованием ксантогенатов и вспенивателей. Обычно флотация протекает медленно, так как флотационную способность сульфидов после цианирования полностью восстановить не удается.

Кислую среду возможно создать обработкой пульпы сернистым газом. Продолжительность обработки и расход газа в единицу времени устанавливают экспериментально, нередко продолжительность достигает нескольких часов. Ограничением данного метода является продолжительное время контакта пульпы с сернистым газом.

Флотацию золота проводят после активации золотосодержащих сульфидов медным купоросом, причем оптимальная продолжительность перемешивания пульпы с этим реагентом может достигать 30–40 мин. Расход медного купороса составляет 20–100 г/т. Собирателями являются сульфидрильные реагенты, вспенивателем — сосновое масло или оксаль.

Применение при обогащении сульфидных руд солей фосфора (полифосфатов, гексаметафосфатов) интенсифицирует процесс флотации, что объясняется их депрессирующим действием на силикаты, а также повышением флотоактивности сульфидных минералов [19]. Соли различных фосфорных и полифосфорных кислот обладают свойствами ионообменников, связывают ионы кальция и магния, а также способствуют пептизации суспензий, что имеет немаловажное значение для хвостов, подвергнутых известковой обработке при цианировании. В [9] указано, что эффективность флотации очень мелких частиц углеводородными маслами возрастает после обработки пульпы реагентами-пептизаторами (жидким стеклом, сульфатом целлюлозы, гексаметафосфатом натрия (ГМФ)).

Поисковые эксперименты по флотации исследуемых хвостов на фабричном режиме (медный купорос — 60 г/т, бутиловый ксантогенат (суммарно в основную и контрольную операции) — 153 г/т, Flotanol (суммарный расход) — 10.2 г/т) не обеспечили приемлемых технологических показателей. Дальнейшие исследования осуществлялись с тем же перечнем реагентов при различной вариации расходов. Флотацию вели в нейтральной среде (рН 7), опираясь на рекомендации [2]. Учитывая, что для получения отвальных по золоту хвостов иногда приходится применять повышенный расход собирателя, расход его в некоторых опытах достигал 500 г/т.

В пульпу реагенты дозировали в виде 0.1 % раствора для реагента Flotanol, ксантогенат и медный купорос дозировали в виде 1 % растворов. Время кондиционирования с каждым из реагентов — 2 мин. Время флотации составило 8, 5, 6 мин для основной, перечистой и контрольной операций соответственно. В зависимости от условий экспериментов предусматривалась подача керосина (в капельном виде), а также реагента-диспергатора ГМФ.

Подачу керосина предусматривали исходя из предположения, что тонкие микроскопические формы выделения ценного компонента сорбированы на минеральной органике, в частности на углистой составляющей (наличие углистых сланцев в первичной руде). Расход керосина принят 100 г/т, поскольку при повышенных расходах реагент обладает пеногасящим свойством.

Для обоснования эффективности применения реагента-диспергатора проведены предварительные испытания по обработке хвостов реагентом ГМФ. Для этого материал пробы сульфидных хвостов (500 г) замачивали и периодически перемешивали в течение 20 мин с реагентом при расходе последнего 500 г/т. После этого выполняли рассев пробы по схеме рис. 1. Ситовые характеристики “по минусу” с применением ГМФ и без него приведены на рис. 2.

Определено, что при дополнительной обработке проб реагентом ГМФ изменяется распределение зерен по классам крупности, наиболее значительные изменения наблюдаются в выходах классов –40 + 20 мкм, –20 + 10 мкм, которые являются наиболее продуктивными, учитывая опыт исследовательских работ.

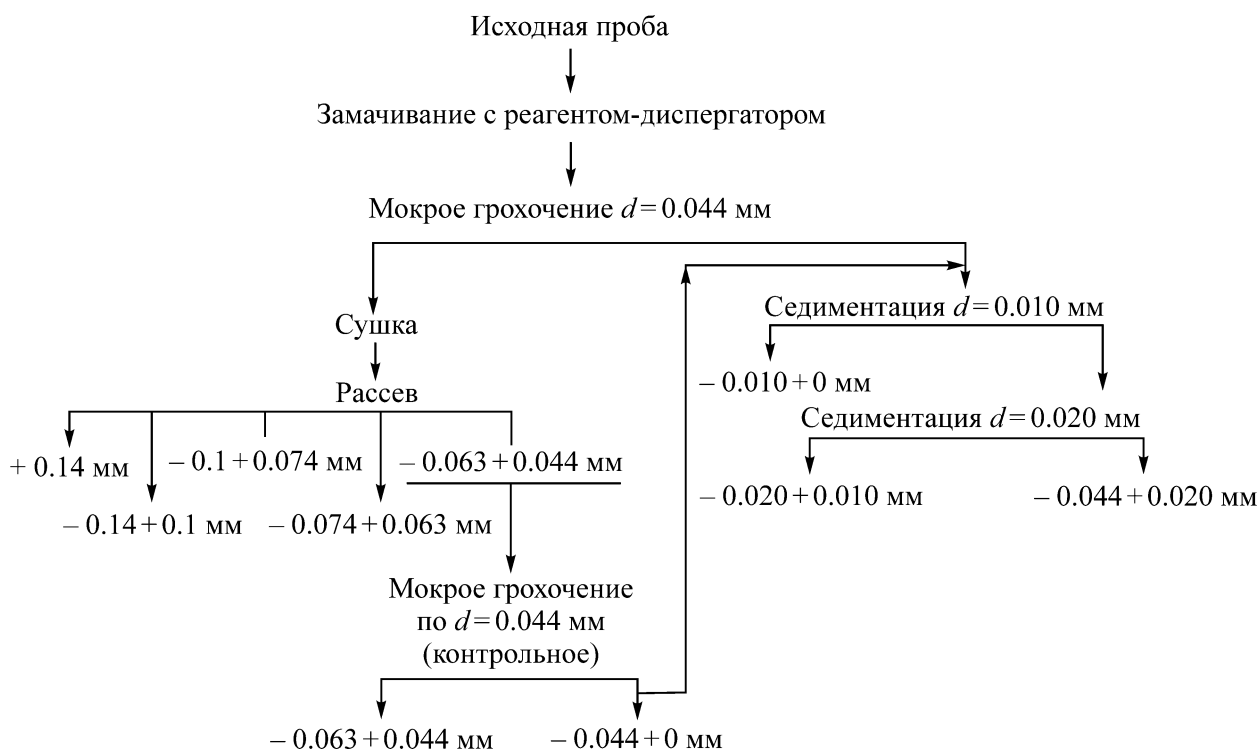


Рис. 1. Схема рассева лежалых хвостов после диспергирования с ГМФ

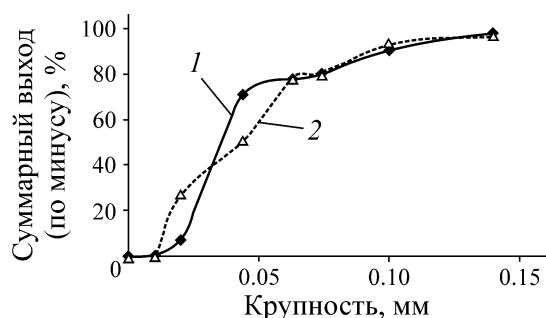


Рис. 2. Ситовые характеристики крупности хвостов “по минусу”, полученные с применением диспергатора (1) и без него (2)

Только предварительное диспергирование пульпы с реагентом ГМФ при расходе 500 г/т и добавка аполярного реагента-собирателя керосина к ассортименту ранее испытанных реагентов привели к увеличению извлечения золота в концентрат (видимо, ввиду повышения выхода продукта с 1.5 до 5.0 %). Несмотря на уменьшение потерь металла с хвостами на 14.9 %, не было достигнуто отвального содержания металла: содержание с 0.46 снизилось до 0.37 г/т.

Проведены тесты на хвостах пробы 1 с целью определения эффективности применения механического активирования (оттирки поверхности) — непродолжительного измельчения проб хвостов в шаровой мельнице как меры борьбы с грануляцией заизвесткованных и цементированных агрегатов минеральных зерен. Обновление поверхности показало близкие результаты с предыдущим экспериментом, где применялся ГМФ (с поправкой, что на суммарный результат флотации повлияло также дозирование керосина). Потери с хвостами составили порядка 58.5 %, при содержании в них 0.36 г/т.

Эффективность применения керосина можно оценить по результатам флотации пробы 1: потери золота с хвостами уменьшились на 6 %, при снижении содержания в них с 0.36 до 0.34 г/т. Извлечение металла в концентрат возросло с 29.3 до 32.5 %, при этом содержание несколько уменьшилось вследствие увеличения выхода концентрата с 3.83 до 6.29 %.

Далее испытывали возможность флотации после предварительной обдирки поверхности, применения реагента-диспергатора ГМФ (при постоянном расходе 500 г/т) и повышенного расхода собирателя, который варьировали в интервале 126–500 г/т. Обнаружено, что при повышении расхода собирателя в указанном интервале наблюдается закономерное увеличение извлечения металла в концентрат с 42.05 до 45.38 %, содержание золота в хвостах флотации уменьшается с 0.32 до 0.27 г/т, потери с хвостами снизились на 9.3 %.

В исследованиях на обогатимость флотацией для лежалых хвостов пробы 2 принято решение предусмотреть помимо активатора и сульфгидрильного собирателя подачу аполярного реагента-собирателя керосина. Учитывая пеногасящие свойства керосина (ввиду адсорбции на поверхности флотационных пузырьков и вытеснения молекул вспенивателя в водную прослойку между ними), расход реагента Flotanol увеличивали по ходу процесса не менее чем в 3 раза (с 8.4 до 25.2 г/т в основную операцию, с 1.8 до 5.4 г/т — в контрольную).

Отмечено, что по сравнению с пробой 1 выход концентрата во флотационных опытах на хвостах пробы 2 был не ниже 4 %. При фабричных режимах по активатору и сульфгидрильному собирателю потери металлов с хвостами варьировали на уровне 55–64 %, а содержание в хвостах — не ниже 0.44–0.38 г/т. Применение реагента ГМФ увеличило извлечение металла в концентрат на 11.7 % при незначительном росте выхода продукта, снизило потери металла с хвостами на 7.7 %, однако не обеспечило отвальных по содержанию хвостов.

Аналогично исследованиям предыдущей пробы, лучшие результаты достигнуты при оттирке поверхности материала пробы, применении реагента-диспергатора ГМФ 500 г/т и увеличении расхода собирателя со 126 до 500 г/т. Определено, что извлечение металла в концентрат закономерно растёт с 42.55 до 43.72 %, содержание в хвостах уменьшается с 0.33 до 0.31 г/т, а потери золота с хвостами снижаются на 5.42 %.

Наиболее сложной в технологическом отношении представляется проба 3. На фабричном реагентном режиме получена самая низкая степень концентрации металла в концентрат (3.5), потери металла составили 73.64 %. При этом отмечены наибольшие колебания по содержанию золота (пробы 2) во флотационных опытах и в целом низкие его значения.

По сравнению с применением фабричного режима, кондиционирование хвостов пробы 3 с реагентом ГМФ при расходе 500 г/т и дозирование аполярного собирателя (керосина) привело к увеличению извлечения золота в концентрат основной операции на 3 % при сохранении выхода его на одном уровне (7.5 %), однако при реализации всей схемы отвального содержания в хвостах достигнуто не было (содержание в них снизилось с 0.24 до 0.23 г/т), потери металла уменьшились на 1.6 %.

Несколько выше оказались показатели с применением обновления поверхности материала хвостов в мельнице (5 мин) с последующей флотацией на фабричном режиме с дополнительной подачей керосина. Данные мероприятия способствуют повышению извлечения на 8.5 %, при этом потери золота с хвостами ниже на 8.32 %, а содержание в них уменьшается с 0.24 (фабричный режим) до 0.22 г/т.

Учитывая положительный опыт применения предложенных технических решений (рис. 3), исследования выполнены с применением оттирки совместно с дозированием диспергатора ГМФ и керосина, при этом исследовали влияние расхода сульфгидрильного собирателя от 126 до 500 г/т.

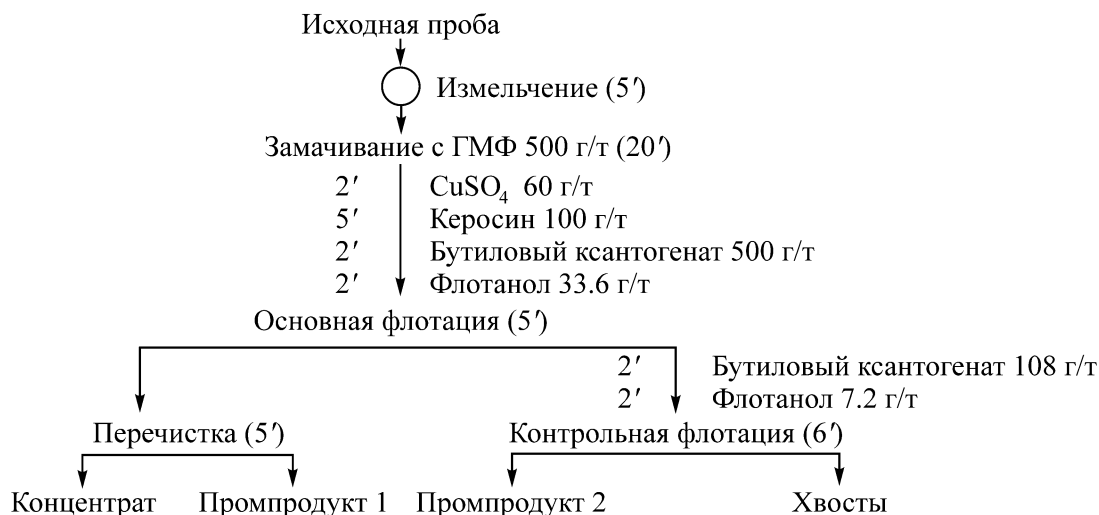


Рис. 3. Схема доизвлечения металла из лежалых хвостов обогатительной фабрики

Определено, что при варьировании расхода в этих экспериментах извлечение металла в концентрат немного увеличивается с 26.4 до 29.0%, при этом незначительно снижаются потери с хвостами (на 4%), содержание металла в хвостах остается примерно на одном уровне (0.2 г/т).

Технологические показатели, полученные для хвостов проб 1, 2 и 3, приведены на рис. 4. Флотацией удалось достигнуть отвального хвостового содержания 0.31, 0.27, 0.19 г/т для проб 1, 2 и 3 соответственно, при этом извлечение золота в пенный продукт флотации составило 30.0–45.4%, т. е. практически 1/2 содержащегося в хвостах золота может быть извлечена без применения сложных в реализации мероприятий на обогатительной фабрике.

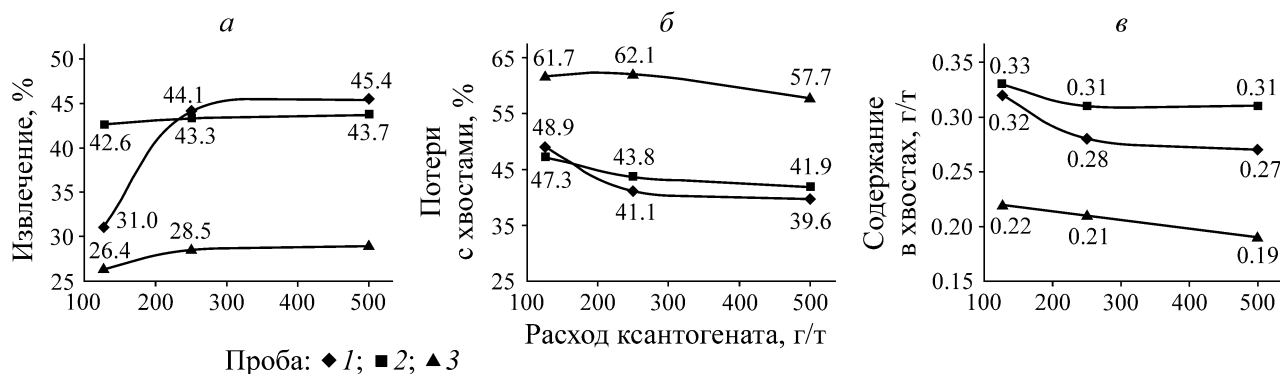


Рис. 4. Зависимость извлечения золота в пенный продукт флотации (а) и в хвосты (б) от расхода собирателя при постоянных условиях обновления поверхности, применения реагента-диспергатора ГМФ 500 г/т; влияние расхода собирателя на содержание металла в отвальных хвостах флотации (в)

ВЫВОДЫ

Выполнены исследования вещественного состава материала проб хвостохранилища, представленного сульфидным, смешанным и окисленным составом. Установлено, что минеральный состав лежалых хвостов представлен теми же минералами, что и исходные руды, перерабатываемые в различные годы на обогатительной фабрике. Основным нерудным минералом является кварц, среди рудных минералов выделяются пирит, арсенопирит, проба окисленных хвостов отличается наличием гидроокислов железа.

По результатам химического анализа относительно богатой по золоту является проба хвостов смешанного состава, содержание металла в которой составило 0.61 г/т, в пробе сульфидных хвостов содержание золота — 0.57 г/т. Наибольшую технологическую упорность проявляет проба окисленных хвостов, содержание в которой не превышает 0.3 г/т. Все пробы характеризуются высоким содержанием шламовой фракции: выход класса –0.044 мм — 50–64 %; класса –0.020 мм — 14–27 % (в зависимости от пробы). При этом наблюдается дефицит в материале тонкого шлама крупностью менее 10 (15) мкм. Это косвенно может указывать на агломерацию шлама при хранении хвостов в хвостохранилище или после их извлечения из разведочной скважины.

Флотационными исследованиями на материале проб хвостохранилища показана возможность доизвлечения золота с получением отвального содержания металла в хвостах только в случае предварительной оттирки материала, а также последующего замачивания с реагентом-диспергатором ГМФ при расходе 500 г/т. Наибольшее извлечение в пенные продукты флотации и отвальные по золоту хвосты обеспечивает реагентный режим, предусматривающий подачу в основную операцию медного купороса, керосина, бутилового ксантогената, флотанола; при этом в контрольной операции расход собирателя равен 108 г/т, пенообразователя — 7.2 г/т. Содержание золота в хвостах флотации составило 0.31, 0.27, 0.19 г/т для проб смешанного, сульфидного и окисленного состава соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чантурия В. А.** Инновационные процессы в технологиях переработки минерального сырья сложного вещественного состава // ГИАБ. — 2009. — № 12. — Т. 15.
2. **Bantshi A. M. and Makuvise P.** Extraction of gold from sands and slimes tailings dump from Mazowe mine, Zimbabwe, Minerals, Metals and Materials Series, 2017. — P. 507–517.
3. **Dudenev A. W. L., Chan B. K. C., Bouzalakos S., and Huisman J. L.** Management of waste and wastewater from mineral industry processes, especially leaching of sulphide resources: state of the art, Int. J. of Mining, Reclamation and Environment, 2013, Vol. 27, Issue 1. — P. 2–37.
4. **Maboeta M. S., Oladipo O. G., and Botha S. M.** Ecotoxicity of mine tailings: unrehabilitated versus rehabilitated, Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2018, Vol. 100, Issue 5. — P. 702–707.
5. **Sudibyo, Aji B. B., Sumardi S., Mufakir F. R., Junaidi A., Nurjaman F., Karna, and Aziza A.** Taguchi optimization: case study of gold recovery from amalgamation tailing by using froth flotation method, AIP Conference Proceedings, 2017, Vol. 1805, Issue 1. — P. 050003.
6. **Евдокимов С. И., Евдокимов В. С.** Технологии переработки отходов россыпной золотодобычи // Экология и пром-сть России. — 2017. — Т. 21. — № 9. — С. 10–15.
7. **Евдокимов С. И., Евдокимов В. С.** Технология совместного освоения руд и техногенных россыпей золота // Цв. металлы. — 2017. — № 9. — С. 20–28.
8. **Бектурганов Н. С., Арыстанова Г. А., Койжанова А. К., Ерденова М. Б.** Сравнительное изучение эффективности способов извлечения золота из техногенных хвостов флотации // Цв. металлы. — 2016. — № 10. — С. 69–72.
9. **Зинченко З. А., Тюмин И. А.** Исследования по извлечению золота из хвостов флотации руды нижних горизонтов Джиджикрусского месторождения тиомочевинной // ДАН Республики Таджикистан. — 2013. — Т. 56. — № 10. — С. 796–800.
10. **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. 34–44.
11. **Зеленов В. И.** Методика исследования золото- и сербросодержащих руд. — М.: Недра, 1989. — 301 с.

12. Алгебраистова Н. К., Алексеева Е. А., Коляго Е. К. Минералогия и технология обогащения лежалых хвостов Артемовской ЗИФ // ГИАБ. — 2000. — № 6. — С. 191–197.
13. Лыгач В. Н., Ладыгина Г. В., Саморукова В. Д., Шубодеров А. В. Доизвлечение золота из отходов переработки бедных золотосодержащих руд Южного Урала. URL: http://www.giab-online.ru/files/Data/2007/8/25_Ligach24.pdf.
14. Мейманова Ж. С., Ногаева К. А. Исследование флотационной обогатимости лежалых хвостов ОФ “Солтон-Сары” // Наука и новые технологии. — 2014. — № 2. — С. 15–16.
15. Лодейщиков В. В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. — Иркутск: Иргиредмет, 1999. — 342 с.
16. Брагин В. И., Коннова Н. И. Извлечение ценных минералов из хвостов обогащения // ГИАБ. — 2011. — № 12. — С. 165–169.
17. Алексеев В. С., Банщикова Т. С. Извлечение упорных форм золота из гравитационных концентратов и хвостов обогащения россыпей с применением химических реагентов // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 159–164.
18. 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.
19. Глембоцкий В. А. Флотационные методы обогащения. — М.: Недра, 1981. — 148 с.

Поступила в редакцию 15/VI 2018