

УДК622.765

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА
НА ОСНОВЕ СОВМЕСТНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РУДЫ И ОТХОДОВ**

С. И. Евдокимов¹, В. С. Евдокимов²

¹*Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(Государственный технологический университет), E-mail: eva-ser@mail.ru,
ул. Николаева, 44, 362021, г. Владикавказ, Республика Северная Осетия-Алания, Россия*
²*ООО “Научно-производственное предприятие ГЕОС”,
ул. Леваневского, 253, 362035, г. Владикавказ, Республика Северная Осетия-Алания, Россия*

Представлена гравитационно-флотационная технология совместной переработки золотосодержащих руд и отходов россыпной золотодобычи, обеспечивающая высокое извлечение металла. Исследования проведены на пробе руд эксплуатируемого коренного месторождения золота и техногенных отходов россыпной золотодобычи, расположенных в Яно-Колымской золотоносной провинции РФ. Отличительная особенность разработанной технологии — применение шлихового золота в цикле флотации рудного золота. Шлиховое золото выделяют из отходов россыпной золотодобычи гравитационными методами обогащения. При обогащении руд и песков техногенной россыпи технологические схемы гравитации и флотации построены по струйному принципу движения исходного сырья и чернового концентрата. Во второй струе флотации применяется технология аэрозольной колонной флотации. Выполнена оценка эффективности инвестиций в горное предприятие по совместной переработке руд и техногенной россыпи золота.

Россыпное золото, золотосодержащая руда, совместная переработка, гравитационно-флотационная технология, оценка экономической эффективности

Для золотодобывающей отрасли России вовлечение в отработку малообъемных техногенных ресурсов является важным направлением эффективного использования ее сырьевой базы [1–3]. Известен зарубежный опыт промышленного освоения отходов горно-металлургических производств [4–7].

У золотодобывающих предприятий нет конкурентов в сфере реализации продукции, так как золото — стандартизированный товар с практически абсолютной ликвидностью. По данным агентства Thomson Reuters GFMS, совокупный объем мирового спроса на золото составляет более 4100 т. Золото находит широкое применение в электронике и фармакологии, но традиционным и самым крупным его потребителем (с долей в совокупном спросе стабильно выше 50 %) остается ювелирная промышленность (85 % производимого металла). Соотношение между ее спросом и предложением со стороны золотодобывающей промышленности — самого устойчивого сегмента мирового рынка золота — ключевой фактор, определяющий цену на золо-

Статья подготовлена при поддержке Соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0142 (RFMEFI57714X0142).

то. Крупнейшие потребители золота — Индия и Китай, уверенно лидирующие среди стран-производителей золота и ежегодно наращивающие объемы производства. Золото — распроданный инвестиционный инструмент.

В России в нераспределенном фонде находится 30 % разведанного золота (с суммарными балансовыми запасами свыше 1.21 тыс. т металла), сосредоточенного примерно в 100 малых источниках золотодобычи [8]. Причина заключается в том, что индивидуальная эксплуатация таких георесурсов нерентабельна, так как небольшой объем производимой из них продукции недостаточен для окупаемости издержек на ее производство [8]. Вовлечение в хозяйственный оборот техногенных рентабельных золотосодержащих ресурсов позволит увеличить количество сдаваемого в Гохран России металла в ближайшие 10–20 лет на 20–30 т ежегодно. В то же время при переработке руд коренных месторождений золота основные потери металла с отвальными хвостами связаны с его “физически” упорным морфотипом — мелким и тонким золотом.

Решение задачи возможно на основе разработки технологии совместной переработки руд с “физически” упорными формами золота и техногенных россыпей золота с небольшой извлекаемой ценностью, расположенных в территориальной доступности от действующей золотоизвлекательной фабрики (ЗИФ). Совместная переработка золотосодержащих георесурсов предполагает получение суммарного экономического эффекта за счет увеличения сквозного извлечения золота и снижения общих удельных капитальных, эксплуатационных и организационных затрат.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования служили золотосодержащие георесурсы, расположенные в Яно-Колымской золоторудной провинции, охватывающей северо-западную часть Магаданской обл. (верховья бассейна р. Колымы) и восточную часть Республики Саха (Якутия) (верховья бассейна р. Индигирки и верховья бассейна р. Адычи — притока р. Яна). Россыпное месторождение расположено в устьевой части р. Берелех и в бассейне нижнего течения р. Аян-Юрях. В настоящее время проводится переработка техногенных отвалов, эксплуатационные работы ведутся также на флангах ранее отработанных площадей. При опробовании отвалов для разработки технологии доизвлечения золота отобрана проба крупностью частиц – 3 мм и массой 407 кг. Второй объект исследования — руды расположенного в этой же провинции месторождения “Павлик” с запасами золота 152 т по кодексу JORC. Для испытаний отобрана проба руд крупностью – 25 мм и массой 374 кг.

В исследуемых отвалах распределение золота соответствует положительной асимметрии и отрицательному эксцессу, а медианная крупность золота составляет 180 мкм. Толщина зерен изменяется от 10 до 50 мкм (~ 75 % золотин имеет толщину от 20 до 35 мкм).

Масса золотин в гале-эфельных отвалах во фракции крупностью (–0.20+0.10) мм изменяется от 0.0007 до 0.070 мг, во фракции крупностью менее 0.10 мм — 0.012 мг. По массе преобладают золотины, которые в центральной части преимущественно сложены высокопробными (947 ед. и выше) фазами Au–Ag (иногда серебристым золотом, электрумом, кюстелитом), а по периферии — серебристым золотом, содержание серебра в котором достигает 25–35 мас. %. Средняя проба — 880 ед. Среди морфологических типов выделяется листовидное, пластинчатое и чешуйчатое золото ярко-желтого цвета с ровной плотной поверхностью, выступы преимущественно сглажены. Золотины не имеют сростков с другими минералами.

Золотины крупностью более 0.20 мм представлены пластинчатыми комковидными формами медистого золота с характерным красноватым цветом (на поверхности наблюдаются щеточки микрокристаллов куприта красного цвета, включения хризоколлы и малахита, пленки халькозина черного цвета). Во фракции крупностью (–1.0+0.25) мм масса золотин изменяется от 0.140 до

0.754 мг. Кайма золотин сложена золото-медной фазой (или Cu–Ag–Au сплавом), которая от центральной части отделена резкой границей. Центральная часть представлена высокопробным (до 90 мас. % Au) золотом, реже кюстелитом (до 80 мас. % Ag) или электрумом (до 70 мас. % Ag). Золото гемиидиоморфное (частично ограненное и дендритовидное) и ксеноморфное (стержневидное, комковатое, пластинчатое) с преимущественно ячеистой и листовой поверхностью с отпечатками других минералов (треугольной, гексагональной и неправильной формы).

В песках присутствует самородное олово, свинец, висмут, а также интерметаллиды переменного состава (Au, Pb), (Au, Ag, Pb, Sb), (Pb, Sb), (Pb, Sn) и (Au, Ag, Pb, Sn). Пирит и халькопирит образуют включения, примесь — ртуть (до 2.7–3.4 мас. %). При переработке песков ртуть практически полностью переходит в тяжелую фракцию гравитации и далее — в “золотую головку”, из которой ее удаляют сублимацией [9].

Шлиховые минералы представлены в основном магнетитом, пиритом, ильменитом, цирконном, турмалином, рутилом; второстепенные минералы — халькопиритом, гранатом, сфеном, эпидотом, титаномагнетитом, гематитом, амфиболами. Полезным компонентом пробы руды месторождения “Павлик” является золото (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Результаты фазового анализа золота в исследуемой пробе исходной руды

| Форма нахождения золота | Содержание, г/т | Распределение, % |
|--|-----------------|------------------|
| Свободное (извлекаемое амальгамацией) | 1.90 | 67.74 |
| В виде сростков с рудными и породообразующими компонентами (цианируемое) | 0.21 | 7.70 |
| В пленках и “рубашках” гидроксидов железа (цианируемое после обработки соляной кислотой) | 0.24 | 8.54 |
| Скрытое в сульфидах | 0.22 | 7.83 |
| Заключенное в силикатах и сорбированное углистым веществом | 0.23 | 8.19 |
| Итого: в пробе (по балансу) | 2.80 | 100.0 |

Амальгамация проведена стадийно при последовательном понижении крупности материала от –2 мм до 90 % класса –71 мкм. Цианирование осуществляли в присутствии сорбента — смолы АМ-2Б в CN- форме; в пробе присутствует более 67 % свободного золота. Зерна металла имеют ярко-желтую окраску, в редких случаях покрыты тонкой пленкой гидроксидов железа. Более 80 % драгоценного металла представлено зернами крупностью –71 мкм, преобладают зерна размером 5–30 мкм. Золото ассоциирует в основном с кварцем и сульфидами, образуя включения размером от 0.001 до 0.3–0.5 мм. Золотины пластинчатого и уплощенного морфотипа слегка деформированные и неправильной формы: доля чешуек и пластинок крупностью 100–120 мкм — 6.1 %. По массе преобладают умеренно (840–920 ед.) высокопробные золотины, остальное золото относительно низкопробное (730–800 ед.).

Содержание золота в пробе определяли методом искровой масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (масс-спектрометр с двойной фокусировкой JEOL JMS-VM2, Япония). Для оптических методов исследований использовали поляризационный микроскоп ECLIPSE LV100-POL, оптический стереомикроскоп SMZ-1500, оснащенный цифровой фото-микрографической системой DS-5M-L1, и стереомикроскоп SMZ-645.

Основным компонентом в пробе руды является кремнезем (61.65 %), присутствуют оксид алюминия (16.58 %), оксид железа (7.25 %), оксид магния (2.87 %), оксид натрия (3.3 %), оксид калия (3.0 %) и оксид кальция (1.3 %). Содержание остальных компонентов не превышает 1 %. Из цветных элементов можно отметить наличие меди с содержанием 0.0564 %, цинка — 0.0317 %, свинца — 0.00529 %, молибдена — 0.0073 %, висмута — 0.0002 %. К вредным примесям относится мышьяк с массовой долей 0.00434 %.

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ И МЕТОДА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Известен способ флотации [9, 10], сущность которого заключается в селективном закреплении мелких частиц на вспомогательном минерале-носителе с последующей флотацией образовавшегося агрегата. Научная идея работы заключается в повышении извлечения мелкого и тонкого свободного золота за счет использования в качестве минерала-носителя шлихового золота с флотационно-активной формой зерен пластинчатого и чешуйчатого морфотипа. Шлиховое золото выделяют из техногенной россыпи гравитационными методами обогащения.

В работах [11, 12] показано, что следствием гидрофобизации поверхности является образование нанопузырьков и участие капиллярных сил при сцеплении тонкой частицы с поверхностью, что при соответствии размера частиц и нанопузырьков способствует последующему образованию флотокомплекса. При гидрофобизации поверхности возможно также прилипание тонких частиц золота к сульфидам по капиллярному механизму, что при наличии золота, связанного с сульфидами, обеспечивает повышение его общего извлечения.

Рассмотренные физические закономерности взаимодействия полидисперсных частиц являются теоретической основой механизма извлечения мелкого и тонкого золота с помощью шлихового золота в качестве минералов-носителей при флотации. На этой теоретической основе разрабатывается технология совместной переработки руд и песков малообъемной техногенной россыпи золота, индивидуальное освоение которой нерентабельно.

При построении технологической схемы совместной переработки рудного и россыпного золота применили струйное противоточное движение исходного питания и черного концентрата [9, 13]. В результате необходимое увеличение содержания золота сопровождалось повышением обогатимости материала (способности к разделению по флотуемости). Указанный эффект не достигается в схемах известной конфигурации с направлением материала из последующих операций обогащения в предыдущие и является причиной высокого извлечения золота.

Для повышения избирательности прилипания пузырьков и полноты извлечения ими ценного компонента, в том числе трудноизвлекаемых размеров, в качестве газовой фазы при флотации использовали смесь воздуха с горячим водяным паром (аэрозоль) [14].

При оценке эффективности инвестиций в горное предприятие по совместной переработке руд и техногенной россыпи золота показателями эффективности взяты чистый дисконтированный доход (в оригинале NPV), внутренняя норма доходности (IRR), индекс доходности PI дисконтированных инвестиций, дисконтированный период окупаемости инвестиций (DPP) [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Выполнены исследовательские испытания двух технологий обогащения золотосодержащего сырья. По первой из них пробу руды обогащали по гравитационно-флотационной схеме со струйным противоточным движением исходного питания и черного концентрата в цикле аэрозольной колонной флотации. Отличительной особенностью второй технологии является применение шлихового золота, выделенного из гале-эфельных отвалов гравитационными методами обогащения, в качестве минералов-носителей в цикле флотации рудного золота (рис. 1). В опытах массу руды и песков техногенной россыпи подбирали так, чтобы в совместную переработку поступало 85–90 % первичных руд и 10–15 % отходов россыпной золотодобычи.

Для извлечения шлихового золота из гале-эфельных отвалов применяли винтовые шлюзы, в тяжелую фракцию которых извлечено 90.55 % (от операции) шлихового золота при содержании 93.89 г/т. Для получения черного концентрата во II струе флотации использовали противоточную колонну диаметром 47 мм. Высота колонны 1.97 м, при этом 1.55 м составляет высота зоны минерализации и 0.42 м — высота зоны очистки. При скорости пульпы 1.17 см/с удельная производительность колонны по исходному продукту $10.1 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^3)$ и по пенному продукту $2.8 \text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^3)$. Для подавления механического выноса нефлотуемых частиц в кон-

центрат расход промывной воды поддерживали на уровне $0.032 \text{ м}^3/(\text{мин} \cdot \text{м}^3)$, что обеспечивало превышение потока воды в хвосты по сравнению с потоком воды в питание на 5–7%. В качестве газовой фазы при флотации использовали паровоздушную смесь (аэрозоль), которую в виде спутных потоков насыщенного водяного пара ($105 - 110 \text{ }^\circ\text{C}$) и воздуха подавали боковым донным инжектором конфузор-диффузорного типа. Давление воздуха на входе в аэратор $0.12 - 0.15 \text{ МПа}$, давление инжектируемого пара 0.12 МПа , давление воздуха на входе в эрлифт $0.07 - 0.19 \text{ МПа}$. Расход воздуха $0.70 \text{ м}^3/\text{мин}$ на 1 м^2 сечения колонны, расход воздуха в эрлифт $0.045 \text{ м}^3/(\text{мин} \cdot \text{м}^3)$. Газосодержание во флотационной колонне 14–16%.

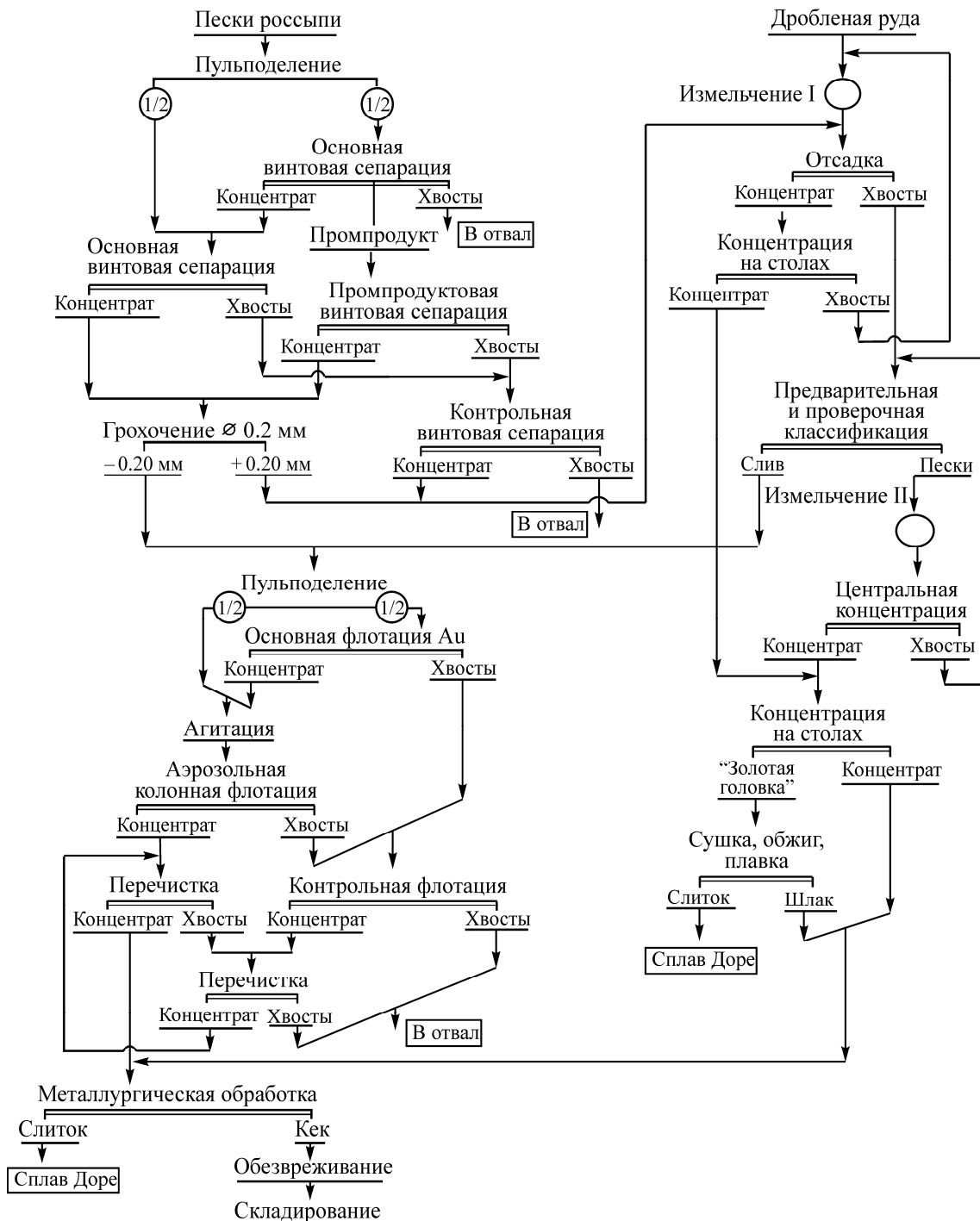


Рис. 1. Технологическая схема совместной переработки руд и песков техногенной россыпи золота

Содержание класса – 71 мкм в питании флотации 85 %, содержание твердого в пульпе 25 %. Расход реагентов при флотации составил, г/т: кальцинированная сода — до рН 8.5–8.7 (для связывания активирующих минералов пустой породы катионов железа), флокулянт ПАА-27 (или КМЦ — 34 г/т), медный купорос — 70, ксантогенат калия бутиловый — 90+25+25 (дробная подача), оксаль Т-80 — 25+25+25. Продолжительность основной флотации 7 мин, контрольной — 10 мин. Результаты совместной переработки отходов россыпной золотодобычи и золото-содержащих руд, полученные в опытах, моделирующих замкнутый цикл процесса, приведены ниже:

| | |
|---|---------|
| Содержание золота: | |
| руда, г/т..... | 2.80 |
| пески россыпи, мг/м ³ | 300.0 |
| Выход продуктов обогащения, %: | |
| шлиховое золото..... | 0.032 |
| “золотая головка”..... | 0.00034 |
| концентрат гравитации..... | 1.75 |
| концентрат флотации..... | 3.18 |
| Содержание золота в продуктах обогащения, г/т: | |
| шлиховое золото..... | 93.89 |
| “золотая головка”..... | 304.299 |
| концентрат гравитации..... | 36.55 |
| концентрат флотации..... | 24.26 |
| отвальные хвосты обогащения сырья..... | 0.207 |
| Извлечение золота в продукты обогащения, %: | |
| шлиховое золото..... | 1.14 |
| “золотая головка”..... | 39.19 |
| концентрат гравитации..... | 24.23 |
| концентрат флотации..... | 29.22 |
| Извлечение золота из концентратов пиро- и гидрометаллургией, %: | |
| плавка “золотой головки”..... | 85.24 |
| цианирование концентрата гравитации и флотации..... | 99.90 |
| цианирование концентрата флотации..... | 86.26 |
| Извлечение в лигатурное золото, %..... | |
| | 85.24 |
| Потери золота с отвальными хвостами, %: | |
| при обогащении сырья..... | 14.76 |
| при металлургической переработке концентратов..... | 7.37 |
| | 7.39 |

Представительные по качеству и объему промежуточные продукты формировались при 5–6-кратной их циркуляции: содержание золота в хвостах 6-й навески руды стабилизировалось, и расхождение в извлечении золота в 5-й и 6-й навесках не превышало ошибки его определения.

Применение шлихового золота в качестве минерала-носителя позволяет извлекать из сырья 92.63 % золота (против 87.36 % при индивидуальной переработке руд) в концентрат, содержащий 51.15 г/т золота (против 39.84 г/т без загрузки шлихового золота). Повышение извлечения золота в цикле обогащения произошло за счет снижения содержания золота в отвальных хвостах с 0.377 до 0.207 г/т. Из анализа распределения золота по классам крупности в отвальных хвостах следует, что уменьшение потерь золота получено за счет снижения почти в 3 раза потерь металла крупностью (–0.040 + 0.010) мкм (табл. 2). Из этого класса крупности минералами-носителями извлечено ~ 66 % золота, а из класса крупности (–0.040 + 0) мкм — ~ 43 % золота.

Почти трехкратное снижение потерь с отвальными хвостами золота крупностью (–0.040 + 0.010) мкм, достигаемое при загрузке во флотацию шлихового золота, подтверждено построением кривой распределения сростков по степени раскрытия в хвостах флотации по методу Конева [9]. Применение разработанной технологии позволяет уменьшить выход концентрата, направляемого на цианирование, с 6.14 до 4.85 %.

ТАБЛИЦА 2. Распределение золота по классам крупности в отвальных хвостах при переработке руд и совместной переработке руд и песков россыпи

| Класс крупности, мкм | Распределение золота по классам крупности, % | |
|-------------------------|--|--------------------------------------|
| | индивидуальная переработка руд | совместная переработка руд и россыпи |
| –0.200+0.100 | 1.4 | 14.4 |
| –0.100+0.040 | 25.5 | 43.9 |
| –0.040+0.010 | 41.1 | 14.0 |
| –0.010+0 | 32.0 | 27.7 |
| Итого | 100.0 | 100.0 |

Сокращение количества цианируемого концентрата снижает эксплуатационные расходы за счет экономии химических реагентов, затрачиваемых при цианировании концентратов и обезвреживании хвостов (известь 400 г/т, цианид натрия 120 г/т, каустическая сода 45 г/т, соляная кислота 9 г/т, кальция гипохлорит нейтральный 1190 г/т, железный купорос 1514 г/т, активированный уголь 5–6 г/т). После металлургической переработки концентратов гравитации и флотации извлечение золота в пригодный для аффинажного производства конечный продукт составляет 85.24 %, что соответствует лучшим показателям зарубежных ЗИФ, перерабатывающих аналогичное сырье [8].

По методике, изложенной в [8], проведено имитационное моделирование отработки техногенной россыпи индивидуально и совместно с эксплуатируемыми запасами месторождения рудного золота в условиях Магаданской области (табл. 3). Месторождения группы осваивают вахтовым методом с сезонным режимом работы. Георесурсы группы разрабатывают малые горные предприятия холдинга как участки одного. Предприятия оснащены мобильными обогатительными комплексами с технологиями глубокой переработки сырья и получением товарной высоколиквидной продукции на месте, что обеспечивает снижение капитальных затрат на 25 %.

ТАБЛИЦА 3. Результаты оценки эффективности инвестиций в горные проекты

| Показатель | Индивидуальное освоение отходов | Совместная переработка руд и отходов |
|---|---------------------------------|--------------------------------------|
| Объем переработки исходного сырья: | | |
| отходы россыпной золотодобычи, тыс. м ³ | 517.0 | — |
| первичные руды и отходы россыпной золотодобычи, тыс. т | — | 6210.0 |
| Содержание золота в исходном сырье: | | |
| отходы россыпной золотодобычи, мг/м ³ | 300 | — |
| первичные руды и отходы россыпной золотодобычи, г/т | — | 2.68 |
| Объем реализации Q золота, кг | 140.45 | 14185.61 |
| Средневзвешенная цена реализации P золота, \$ за 1 г золотого эквивалента | 41.0 | 41.0 |
| Выручка от реализации (TR) золота, \$ млн | 5.758 | 581.564 |
| Полная себестоимость (AISC) производства золота, \$ млн | 5.8 | 376.3 |
| Эксплуатационные затраты на вскрышу, добычу, транспортировку и обогащение, \$ млн | 4.2 | 266.8 |
| Капитальные затраты на добычу и обогащение, \$ млн | 1.6 | 109.5 |
| Чистый дисконтированный доход (NPV), \$ млн | –0.02 | 107.8 |
| Индекс доходности PI дисконтированных инвестиций | –0.04 | + 3.77 |
| Дисконтированный период окупаемости инвестиций (DPP), лет | Не окупается | 5 |
| Ставка дисконтирования E , % | — | 18 |
| Внутренняя норма доходности IRR, % | 14.7 | 35.2 |

Горно-геологические параметры отходов россыпной золотодобычи позволяют использовать бульдозерную технологическую схему при проведении горно-подготовительных и транспортную схему при производстве добычных работ. Горно-подготовительные работы (ГПР) выполняют бульдозером Komatsu D375A-6R и начинают с очистки полигона от лесной растительности и снега. Для сбора дренажных вод, отвода ливневых вод и отвода русла проходят нагорную и руслоотводные траншеи. Строят дамбы и пруды-отстойники для очистки карьерных вод от взвешенных веществ перед сбросом на рельеф местности, а также эфельных (с целью формирования карты намыва) и иловых продуктов и технологической воды; проводят рекультивацию.

При доизвлечении золота из отходов переработки россыпи предварительное рыхление пород осуществляют бульдозерно-рыхлительным агрегатом типа Д-575С на базе трактора Т-180. Горно-геологические параметры отходов переработки первичной россыпи позволяют их подачу на питатель ОЗК-14 промывочного комплекса АСК-200 с отвалообразователем ОЗП-1000 выполнять комбинированным экскаваторно-бульдозерным комплексом экскаватор – автосамосвал – бульдозер. На разработке песков используют экскаватор Komatsu PC-750, транспортируют добытую горную массу автосамосвалами Komatsu HD-405 на расстояние 700 м. Выкучивание (расстояние 700 м) и подачу песков к скруббер-бутаре (расстояние 30 м) осуществляют бульдозером типа Komatsu D375A-6R, подачу песков на промывку и удаление гале-эфелей — бульдозерами типа Komatsu D-65E. Продолжительность работ по промывке песков 150 дней при двухсменном режиме с продолжительностью рабочей смены 11 ч; рабочая неделя непрерывная. Проходку нагорных канав, строительство дамб отстойников (эфельного — с целью формирования карты намыва, илового и технологической воды) и рекультивацию проводят бульдозером Komatsu D375A-6R. Затраты (маш-ч) на ГПР и добычные работы в общем балансе времени составляют соответственно 10 и 90%. Электропитание осуществляют от ДЭС DSA-800 (560 кВт), предусмотрены автомашины типа Урал-4320 (вахтовка, грузовой, заправщик) и автокран типа Урал-5557.

При промывке песков выделяют продуктивный класс в виде просева барабанного грохота [9] крупностью менее 2 мм (отсев грохота направляют в отвал) и насосом подают для перечистки (доводки) на шлюз-грохот — аппарат первого приема мобильного обогатительного комплекса конструкции ООО “НПП ГЕОС” (рис. 2).

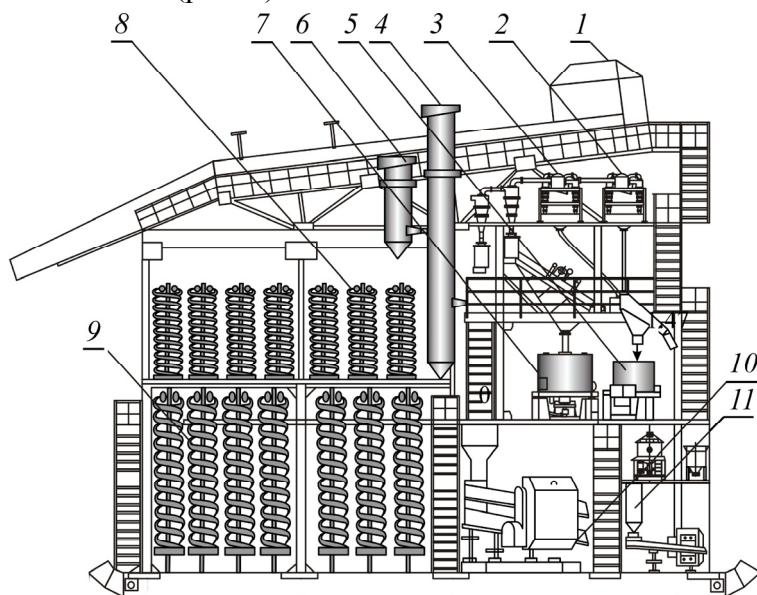


Рис. 2. Мобильный (сборно-разборный) обогатительный комплекс для первичной переработки отходов россыпной золотодобычи: 1 — шлюз глубокого наполнения; 2, 3 — винтовые сепараторы; 4, 5 — центробежные концентраторы; 6, 7 — концентрационные столы; 8, 9 — колонные флотомашины для аэрозольной флотации; 10, 11 — батарея гидроциклонов

Доводочный комплекс укомплектован винтовыми шлюзами (57 аппаратов типа ШВЗ-1000 для основной и перечистой операций), тяжелую фракцию которых перечищают на концентрированных столах (трех столах типа СКО-15 и двух столах типа СКО-7.5). Хвосты основной и промпродукт перечистой винтовой сепарации перечищают на последовательно установленных (по ходу движения золота) колонных флотомашинах конструкции ООО «НПП ГЕОС» (двух типоразмеров) и центробежных концентраторах ИТОМАК (двух типоразмеров). Гидротранспорт продуктов осуществляют четырьмя насосами типа Warman 2/1.5B-АН и двумя насосами типа Warman 6/4. Затраты на здания и сооружения составляют 0.2 US \$ млн.

Тяжелую фракцию столов совместно перерабатывают с золотосодержащей рудой по схеме рис. 1 с удельными капитальными и эксплуатационными затратами переработки руд месторождения «Павлик» на ЗИФ ОАО «Арлан».

Из результатов моделирования следует, что при переходе от индивидуального освоения малообъемных запасов россыпного золота к их совместной переработке с доступными запасами рудного золота общий экономический эффект становится существенно положительным, суммарные запасы золота группы обеспечивают окупаемость инвестиций в приемлемые для инвестора сроки, внутренняя норма доходности от капиталовложений превышает уровень доходности от помещения средств на банковский депозит, что способствует росту инвестиционного спроса на малообъемные месторождения.

ВЫВОДЫ

Установлено, что применение шлихового золота, выделенного из техногенной россыпи гравитационными методами обогащения, в качестве минералов-носителей при флотации руд позволяет увеличить сквозное извлечение золота за счет снижения его содержания в отвальных хвостах. Экономические показатели металлургического передела улучшаются в результате уменьшения на ~21 % количества направляемого на цианирование концентрата.

Отличительная особенность разработанной технологии — применение струйного принципа построения схем извлечения золота из руд и россыпи и способа аэрозольной колонной флотации рудного золота.

Имитационное моделирование показало, что совместная эксплуатация руд и россыпей золота позволяет перевести малообъемные техногенные запасы россыпного золота, индивидуальная отработка которых убыточна, в разряд экономически выгодных для освоения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвинцев В. С. Проблемы рационального освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов // ФТПРПИ. — 2015. — № 1. — С. 97–105.
2. Литвинцев В. С., Серый Р. С., Банщикова Т. С., Сас П. П. Проблемы оценки и освоения техногенных образований золотосодержащих россыпей Приамурья // ФТПРПИ. — 2016. — № 2. — С. 72–79.
3. Литвинцев В. С. О ресурсном потенциале техногенных золотороссыпных месторождений // ФТПРПИ. — 2013. — № 1. — С. 118–126.
4. Wang C., Harbottle D., Liu Q., Xu Z. Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice, *Mineral Engineering*, 2014, Vol. 58. —P. 113–131.
5. Tripathy S. K., Ramamurthy Y., Singh V. Recovery of chromite values from plan tailings by gravity concentration, *J. of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2011, Vol. 10, No. 1. — P. 13–25.

6. **Ayeni F. A., Madugu I. A., Sukop P., Ibitoye S. A., Adeleke A. A., Abdulwahab M.** Secondary recovery of columbite from tailing dump in Nigerian josmines field, *J. of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2012, Vol. 11, No. 6. — P. 587–595.
7. **Praes P. E., de Albuergue R. O., Lus A. F. O.** Recovery of iron ore tailings by column flotation, *J. of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2013, Vol. 1, No. 5.— P. 212–216.
8. **Самсонов Н. Ю., Ягольницер М. А.** Групповая разработка малых золоторудных месторождений. — Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2012. — 240 с.
9. **Паньшин А. М., Евдокимов С. И., Солоденко А. А.** Минералургия. — Т. 1. Золото: теория и промысел. — Владикавказ: ООО НПКП “Мавр”, 2010. — 960 с.
10. **Евдокимов С. И., Троценко И. Г., Евдокимов В. С.** Доводка золотосодержащих концентратов в условиях малого горного предприятия. Ч. 1: Конструкция реактора для вакуум-термической пиро-селекции золотосодержащих концентратов // *Цв. металлургия*. — 2016. — № 4. — С. 17–24.
11. **Yang J., Duan J., Fornasiero D., Ralston J.** Very Small Bubble Formation at the Solid-Water Interface, *J. Phys. Chem. B*, 2003, Vol. 107. — P. 6139–6147.
12. **Hampton M. A., Nguyen A. V.** Nanobubbles and the nanobubble bridging capillary force, *Advances in Colloid and Interface Science*, 2010, Vol. 154, Issues 1-2. — P. 30–55.
13. **Евдокимов С. И., Евдокимов В. С.** Эффективная технология флотации природного и техногенного медно-никелевого сырья // *Горн. журн.* — 2016. — № 2. — С. 74–78.
14. **Евдокимов С. И., Евдокимов В. С.** Переработка лежалых хвостов свинцово-цинковой обогатительной фабрики // *Изв. вузов. Цв. металлургия*. — 2015. — № 3. — С. 3–11.

Поступила в редакцию 13/VIII 2016