

## ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.271:622.7

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ ПЕСКОВ ПРИ ОСВОЕНИИ СЛОЖНОСТРУКТУРНЫХ ЗОЛОТОРОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

А. Ю. Чебан

*Институт горного дела ДВО РАН,  
E-mail: chebanay@mail.ru, ул. Тургенева, 51, 680000, г. Хабаровск, Россия*

Проведен анализ технических средств, используемых при открытой разработке россыпей. Обоснован комплекс технологических решений, обеспечивающих повышение сквозного извлечения золота из песков россыпей. При разработке сложноструктурного выемочного блока после проведения вскрышных работ уточняются контуры включений богатых песков посредством второй стадии эксплуатационной разведки с локальным сгущением сети скважин. Осуществляется селективное извлечение разнородных песков. Выемка и транспортировка рядовых и бедных песков, составляющих основную часть выемочного блока, ведется высокопроизводительными бульдозерами тяжелого класса, при этом рядовые пески направляются к промывочному прибору, из бедных песков формируется штабель для кучного выщелачивания. Богатые пески с относительно небольшим объемом основной части золота выемочного блока транспортируются к комплексу многостадийного обогащения для высокого извлечения. Полученные при переработке богатых и рядовых песков хвосты, содержащие преимущественно мелкое и тонкое золото, направляются на кучное выщелачивание.

*Сложноструктурный блок, включения богатых песков, селективная выемка, раздельная переработка, обогащение на шлюзах, кучное выщелачивание, ресурсосбережение*

DOI: 10.15372/FTPRPI20240309

EDN: JOMKRF

В настоящее время в связи с усложнением горнотехнических и горно-геологических условий ведения работ освоение месторождений твердых полезных ископаемых должно сопровождаться комплексным решением вопросов последовательности выемки, ресурсосбережения, снижения энергоемкости процессов горно-обогащительного производства и уменьшения их отрицательного воздействия на окружающую среду [1–6]. Истощение минерально-сырьевой базы предопределяет необходимость вовлечения в отработку рудных и россыпных месторождений со все более низким содержанием полезных компонентов [7–10]. Согласно исследованию [7], за последние 20 лет в Якутии среднее содержание золота в песках россыпей уменьшилось в 1.9 раза с 1.8 до 0.95 г/м<sup>3</sup>, увеличилась доля мелких и тонких классов. При этом доля простых по геоморфологии россыпных месторождений золота в регионе сократилась более чем в 2 раза с одновременным увеличением числа сложных. Сохранение интенсивности добычи россыпного

золота достигается преимущественно за счет ускоренного возрастания объемов перерабатываемых песков с использованием все более мощного оборудования. Однако технологии обогащения минеральной массы по-прежнему в основном ориентированы на извлечение золота крупностью более 0.5 мм гравитационным методом, что ведет к большим потерям [11–13]. В России, по оценке института “Иргиредмет”, около 5–6 т золота ежегодно теряется за счет низкого извлечения металла крупностью менее 0.25 мм. По обобщенным данным исследований, 2/3 технологических потерь при обогащении песков на шлюзах промывочных приборов приходится на золото крупностью  $-0.25 + 0.1$  мм и 1/3 потерь — крупностью менее 0.1 мм [11]. Таким образом, вопрос повышения эффективности разработки золотороссыпных месторождений за счет снижения потерь металла является актуальным.

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В большинстве случаев россыпные месторождения золота имеют сложную структуру с неравномерным его распределением. Слагающие элементы — скопления полезного компонента (гнездо, струя, лента, карман и т. п.) отделены друг от друга обедненными промежутками, в связи с чем в относительно небольшом объеме песков содержится значительная часть металла продуктивного пласта. Исследование качественной структуры запасов песков и металла россыпи реки Большой Кураны показало, что в 20 % песков содержится 62 % золота, в том числе в 2 % богатых песков сосредоточено 17 % золота [14]. В работе [15] указывается, что на некоторых россыпях имеется концентрация самородков в линзовидных скоплениях, вытянутых по простиранию, размеры линз варьируют от  $3 \times 1$  м до  $30 \times 4$  м. Данные скопления отделены друг от друга промежутками пониженной продуктивности, при этом неравномерность содержания полезных компонентов в россыпях прослеживается не только в плане, но и по глубине.

Для большинства Дальневосточных регионов горнодобывающая отрасль — важная часть экономики. На 55 предприятиях, занимающихся разработкой россыпных месторождений золота и платины в Амурской области, Хабаровском и Приморском краях, Еврейской автономной области, проведен анализ горного оборудования. Организации, осуществляющие разработку месторождений открытым способом, имеют на своем балансе бульдозеры, экскаваторы, погрузчики, промывочные приборы различных конструкций и другое оборудование. Выемка торфов и песков ведется преимущественно с применением бульдозеров, общий парк которых на рассматриваемых предприятиях составляет 849 единиц и включает в себя машины среднего класса с мощностью двигателя 80–150 кВт, тяжелого класса — 150–300 кВт и сверхтяжелого класса — более 300 кВт (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Количество бульдозеров, применяемых при разработке россыпных месторождений Дальнего Востока

Фирмы-производители бульдозеров	Общее количество	Количество бульдозеров по классам		
		средний	тяжелый	сверхтяжелый
ОАО “Промтрактор”	270	65	93	112
ЧТЗ-Уралтрак	255	249	6	—
Komatsu	201	22	20	159
Shantui	74	33	41	—
Caterpillar	34	4	6	24
Прочие	15	2	10	3
Итого бульдозеров	849	375	176	298

Продукция ОАО “Промтрактор” в основном представлена машинами тяжелого и сверхтяжелого классов (бульдозеры на базе тракторов Т-15, Т-20, Т-25, Т-35), а также бульдозерами среднего класса на базе трактора Т-11; продукция ЧТЗ-Уралтрак — средними бульдозерами на базе тракторов Т-130 и Т-170 практически в полном объеме. Из иностранной техники наибольшее распространение получили бульдозеры Komatsu (Япония), при этом 85.5 % машин данной фирмы относятся к наиболее востребованному и высокопроизводительному сверхтяжелому классу (D-355, D-375, D-475). Примерно 23 и 10 % парка иностранных машин составляют соответственно бульдозеры фирм Shantui (Китай) и Caterpillar (США). Фирма Caterpillar представлена преимущественно сверхтяжелыми машинами CAT-D9R и CAT-D10R, а китайский производитель — машинами среднего и тяжелого классов SD-16 и SD-32. Основной объем работ по выемке и перемещению горной массы выполняется сверхтяжелыми бульдозерами, средние бульдозеры используются при разработке небольших россыпей, а также на вспомогательных работах. Данные по технической оснащенности предприятий, ведущих открытую разработку ряда золотороссыпных месторождений Якутии и Магаданской области, также подтверждают, что выемка и перемещение песков и торфов ведется с применением сверхтяжелых бульдозеров Komatsu D-355, D-375, D-475 и других мощных машин [16–17].

Рост добычи россыпного золота достигается прежде всего за счет ускоренного увеличения объемов промываемых песков с применением все более мощного оборудования. Необходимо отметить, что ширина отвала тяжелых и сверхтяжелых бульдозеров, выполняющих основной объем работ, составляет 4–6 м, вместимость отвала 8–30 м<sup>3</sup> и более [18–19]. Подобные размеры рабочих органов выемочно-транспортирующих машин не позволяют вести качественную селективную выемку разноразмерных песков сложноструктурных пластов россыпных месторождений, в особенности включений богатых песков, которые при относительно небольших объемах содержат значительную долю металла. В результате пески с различным содержанием металла подаются на установку, где промываются в одном режиме, без учета изменчивости геолого-технологических характеристик минерального сырья.

Промывка песков на рассматриваемых предприятиях осуществляется преимущественно с применением гидроэлеваторных шлюзовых приборов (ПГШ). Наибольшее распространение получили приборы ПГШ-II-50, доля которых в общем количестве эксплуатируемых промывочных установок превышает 60 %. Гидроэлеваторные шлюзовые приборы относительно просты в эксплуатации, но характеризуются значительными потерями золота при промывке песков, содержащих большое количество мелкого и тонкого классов [20–23]. Согласно [20], нормативный коэффициент извлечения золота на ПГШ для класса крупности – 0.5 + 0.2 мм составляет 0.700, для класса крупности – 0.2 мм — 0.350.

Снизить потери металла при переработке песков возможно за счет применения развитых (многостадийных) технологий с использованием обогащительных комплексов, оснащенных центробежными концентраторами, отсадочными машинами и другим оборудованием, обеспечивающим высокое извлечение мелкого и тонкого золота [11, 23]. Так, при эксплуатации разработанной институтом “Иргиредмет” отсадочной машины “Труд-12” на комбинате “Алданзолото” извлечение из песков золота класса крупности +0.5 мм составило 99.9 %, класса крупности – 0.5 + 0.25 мм — 94.2 %, класса крупности – 0.25 мм — 90.6 % [11]. Применение развитых технологических схем обогащения песков с использованием гравитационных концентраторов на месторождении “Сухой Лог” обеспечило извлечение золота, %: класса крупности – 0.25 + 0.1 мм — 93–95 и крупностью менее 0.1 мм — 80–85 [11]. На россыпном месторождении “Стахановская терраса” эксплуатируется промывочный прибор ПГНБК (прибор гидроэлеваторный с непрерывным выводом концентрата), оборудованный шлюзами разных типов, винтовыми сепараторами

и концентрационным столом. Количество золота, полученного из концентратов винтовых сепараторов, составило 12.5 % от общего количества, извлекаемого прибором. При этом если на шлюзах глубокого наполнения золото размером менее 0.3 мм практически не улавливалось, то при извлечении на винтовых сепараторах доля класса крупности – 0.3 мм составила около 20 % [24]. Следует отметить, что применение дополнительного обоганительного оборудования усложняет технологический процесс, увеличивает капитальные и эксплуатационные затраты. Например, стоимость центробежных концентраторов Knelson высокая. Для их обслуживания требуется квалифицированный персонал, необходимы относительно чистая вода и дополнительный расход электроэнергии [24–25]. В этой связи переработка всего объема кондиционных песков с применением многостадийных технологий обогащения может оказаться экономически нецелесообразной.

Повысить эффективность промывки песков возможно за счет оптимизации объема эфелей. В работе [26] на основе анализа гранулометрических характеристик песков и золота по совмещенной шкале крупности обоснована возможность дополнительного увеличения объема выделяемой некондиционной фракции на 5–37 %, которая на стадии грохочения направляется в отвал. Установлено, что на отдельных россыпях возможно снижение крупности питания до размера менее 30 мм. Это позволит при ведении обоганительных процессов задействовать оборудование с меньшей производительностью, но с более высокими показателями извлечения.

Увеличить извлечение мелкого и тонкого золота из песков возможно за счет применения технологий кучного или скважинного выщелачивания, которые используются как самостоятельно, так и в комбинации с другими способами [27–32]. Сравнительные технико-экономические расчеты традиционной технологии с промывкой песков и комбинированной — с промывкой песков и последующим кучным выщелачиванием хвостов обогащения применительно к условиям россыпи “Большой Делегеньях” показали, что при коэффициенте вскрыши, равном 5, и содержании в песках тонкого золота в количестве 30 % рентабельность горного производства с переходом на комбинированную технологию увеличится на 64 % [27]. В [28] предлагается способ комбинированной разработки месторождений россыпного золота, заключающийся во вскрытии залежи, селективной выемке высокопродуктивных песков, их гравитационной переработке с последующим возвращением хвостов промывки с содержанием мелкого и тонкого золота в выработанное пространство, бурении скважин в низкопродуктивной части пласта для ведения скважинного выщелачивания золота из бедных песков и хвостов промывки. Недостатком способа является то, что перед осуществлением селективной выемки не проводится уточнение контуров богатых пексов, что может привести к пересортице. Известна комбинированная технология разработки глубокозалегающих россыпей, предполагающая после выявления в ходе первой стадии эксплуатационной разведки зон богатых песков с существенным количеством относительно крупного золота размером более 1.5–2 мм, проведение локального сгущения сети разведочных скважин для уточнения контуров богатых песков [30]. Опережающая выемка богатых песков проводится с применением механических и гидравлических средств выемки, с направлением поднятых на поверхность богатых песков на многостадийное обогащение. Полученные хвосты обогащения возвращаются в выработанное пространство, после чего осуществляется скважинное выщелачивание основной части продуктивного пласта, содержащей рядовые и бедные пески растворами с адаптивными концентрациями. Недостаток технологий с применением скважинного выщелачивания — возможность утечек продуктивного раствора. Кроме того, в процессе выщелачивания не полностью растворяется крупное золото размером более 1–1.5 мм и золото невысокой пробности (менее 800), количество которого на некоторых россыпях может достигать 20–40 % [33].

Цель данной работы — повышение сквозного извлечения металла и снижение затрат на переработку песков россыпей за счет обоснования комплекса технологических решений, обеспечивающих уточнение контуров включений богатых песков в продуктивном пласте перед их выемкой, а также применения гибких комбинированных схем переработки минерального сырья с учетом содержания, классов крупности и пробности металла.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Длительная практика разработки россыпей дает множество примеров их ярко выраженного зонального строения. В большинстве случаев сгущение разведочной сети увеличивает количество выявленных гнезд с богатой минеральной массой при одновременном уменьшении их площади [34]. В Институте горного дела ДВО РАН разработана усовершенствованная технологическая схема добычи и переработки золотосодержащих песков сложноструктурного выемочного блока, представленная на рисунке.



Схема добычи и переработки золотосодержащих песков сложноструктурного выемочного блока:  $C_i$  — содержание золота в  $i$ -й пробе;  $C_p$  — верхнее граничное содержание золота в рядовых песках

После проведения вскрышных работ в случае выявления содержания золота выше рядовых значений осуществляется вторая стадия эксплуатационной разведки с локальным сгущением сети скважин с целью уточнения контуров включений богатых песков. На основании данных эксплуатационной разведки формируется сортовой план с оконтуриванием богатых (при нали-

чий), рядовых, бедных песков в плане и по вертикали. Осуществляется селективное извлечение разнородных песков, при этом выемка и транспортировка рядовых и бедных песков, составляющих основную часть блока, ведется высокопроизводительными бульдозерами тяжелого класса. Рядовые пески перемещаются к промывочному прибору, находящемуся на границе выемочного блока. Бедные пески доставляются далее промывочного прибора за границу выемочного блока в ранее выработанное пространство, где из них формируется штабель для проведения в дальнейшем кучного выщелачивания. Относительно небольшие по объему включения богатых песков штабелируются бульдозером на месте выемки, после чего они перемещаются посредством одноковшового погрузчика к комплексу многостадийного обогащения, расположенному по границе выемочного блока. В случае если ширина включений богатых песков будет меньше ширины отвала бульдозера тяжелого класса, то необходимо применять бульдозер среднего класса, используемый на вспомогательных работах. Перед обогащением проводится дезинтеграция и классификация богатых и рядовых песков с выделением некондиционной фракции + 30 мм. Хвосты обогащения, образовавшиеся в процессе переработки эфелей богатых и рядовых песков, одноковшовым погрузчиком перемещают в штабель для выщелачивания совместного с бедными песками.

Границы выделяемых сортов песков определяются технологическими режимами и параметрами их переработки с применением критерия оценки эффективности комбинированной технологии добычи и переработки песков сложноструктурного россыпного месторождения, в качестве которого предлагается использовать максимум получаемой прибыли в ходе отработки выемочного блока. Критерий оценки эффективности учитывает возможность последующей переработки хвостов обогащения богатых и рядовых песков:

$$\Pi = Q^B c^B k_n^B k_o^{mn} k_m (\Pi - Z^B) + Q^P c^P k_n^P k_o^{od} k_m (\Pi - Z^P) + \\ + Q^B c^B k_n^B (1 - k^{np}) k_b (\Pi - Z^B) + (Q^{xB} c^{xB} + Q^{xP} c^{xP}) (1 - k^{np}) k_b (\Pi - Z^X) \rightarrow \max,$$

где  $Q^B$ ,  $Q^P$ ,  $Q^B$ ,  $Q^{xB}$ ,  $Q^{xP}$  — соответственно объем богатых, рядовых и бедных песков, а также хвостов обогащения богатых и рядовых песков;  $c^B$ ,  $c^P$ ,  $c^B$ ,  $c^{xB}$ ,  $c^{xP}$  — содержание полезного компонента, соответственно в богатых, рядовых и бедных песках, а также хвостах обогащения богатых и рядовых песков;  $k_n^B$ ,  $k_n^P$ ,  $k_n^B$  — коэффициент извлечения из недр богатых, рядовых и бедных песков соответственно;  $k_o^{mn}$ ,  $k_o^{od}$  — средневзвешенный коэффициент извлечения полезного компонента при обогащении с применением многостадийной и одностадийной технологий соответственно с учетом ситового анализа золота;  $k_m$  — коэффициент извлечения полезного компонента при металлургическом переделе;  $\Pi$  — цена полезного компонента;  $Z^B$ ,  $Z^P$ ,  $Z^B$  — затраты на полный технологический цикл по добыче песков и извлечению полезного компонента с учетом эксплуатационной разведки, выемки вскрыши и отвалообразования для богатых, рядовых, бедных песков соответственно;  $Z^X$  — затраты на полный технологический цикл по извлечению полезного компонента из хвостов обогащения богатых и рядовых песков с учетом перемещения минеральной массы и формирования штабеля;  $k^{np}$  — коэффициент, учитывающий долю золота пробностью ниже 800 в бедных песках и хвостах обогащения богатых и рядовых песков;  $k_b$  — коэффициент извлечения полезного компонента при кучном выщелачивании бедных песков и хвостов обогащения богатых и рядовых песков.

Проведена сравнительная технико-экономическая оценка эффективности предлагаемой технологии освоения сложноструктурного россыпного месторождения золота с селективной выемкой и раздельной переработкой разнородных песков и известных технологий горно-

обогащительного производства на примере выемочного блока одного из россыпных месторождений Хабаровского края. Обработка данных эксплуатационной разведки показала среднее содержание золота в интервалах опробования по выемочному блоку —  $0.68 \text{ г/м}^3$ . В результате ситового анализа выявлено, что золото класса крупности  $+2 \text{ мм}$  составляет  $2.7\%$  общей массы; класса крупности  $-2+1 \text{ мм}$  —  $33.4\%$ ;  $-1+0.5 \text{ мм}$  —  $14.2\%$ ;  $-0.5+0.2 \text{ мм}$  —  $32.4\%$ ;  $-0.2 \text{ мм}$  —  $17.3\%$ . Пески месторождения легкопромывистые, содержание крупной фракции  $+30 \text{ мм}$  в песках составляет  $49.8\%$ . Мощность продуктивного пласта изменяется от  $0.8$  до  $2.4$  при средней мощности  $1.5 \text{ м}$ , включения богатых песков в пласте характеризуются мощностью  $0.4–0.8 \text{ м}$ . Продуктивный пласт песков имеет высокую вариативность содержаний полезного компонента. В богатых песках встречаются включения с содержанием до  $7–10 \text{ г/м}^3$  с преимущественно гравобогатым золотом крупностью более  $0.5 \text{ мм}$  изометричной морфологии. В бедных песках основная доля металла представлена золотишками крупностью менее  $0.5 \text{ мм}$  часто пластинчатой формы, при этом средние содержания составляют всего  $0.1–0.2 \text{ г/м}^3$ . Разные содержания, крупность и форма нахождения золота в песках определяют необходимость использования различных технологий переработки минерального сырья для обеспечения наиболее полного извлечения при обеспечении приемлемых затрат. Богатые пески необходимо направлять на многостадийное гравитационное обогащение для максимально возможного извлечения металла, включая и золотишки невысокой пробы, которые не полностью растворяются при выщелачивании из-за наличия оксидной “рубашки”. В то же время бедные пески, содержащие незначительное количество гравобогатого золота, целесообразно сразу направлять на кучное выщелачивание. Исходя из предложенного критерия оценки эффективности комбинированной технологии добычи и переработки песков сложноструктурного месторождения, по содержанию золота кондиционные пески выемочного блока условно разделены на богатые — более  $1.2 \text{ г/м}^3$ , рядовые —  $0.3–1.2 \text{ г/м}^3$  и бедные —  $0.07–0.3 \text{ г/м}^3$ . Поскольку диапазон содержаний золота в выделяемых сортах песков достаточно широкий, то это заведомо перекрывает погрешности химического и гравитационного анализов. Необходимо отметить, что богатые пески составляют всего  $14.9\%$  объема продуктивного пласта, но содержат более половины золота блока. Средняя проба золота, содержащегося в песках, составляет  $860$ , однако  $15.5\%$  золотишек имеют пробу ниже  $800$ . С учетом рекомендуемых данных по извлечению золота разных классов крупности [11, 20] определены средневзвешенные коэффициенты при переработке песков по одностадийной технологии с применением гидроэлеваторных шлюзовых приборов и многостадийной (развитой) технологии с эксплуатацией гидроэлеваторных шлюзовых приборов, центробежных концентраторов и отсадочных машин. В табл. 2 представлены результаты расчетов технико-экономических показателей по извлечению золота из песков при использовании различных технологий.

Относительно невысокое извлечение металла при переработке песков общим потоком на шлюзах (расчетный средневзвешенный коэффициент извлечения золота при обогащении песков составил  $75.8\%$ ) вызвано наличием большого количества золота классов крупности  $-0.5+0.2 \text{ мм}$  и  $-0.2 \text{ мм}$ . В результате  $24.2\%$  золота преимущественно мелкого и тонкого остается в хвостах обогащения. Применение многостадийной технологии переработки песков общим потоком, а также комбинированной переработки песков общим потоком на шлюзах и последующим кучным выщелачиванием хвостов обогащения позволяет существенно повысить извлечение золота. Однако использование дополнительных технологических процессов и оборудования для переработки всего объема кондиционных песков ведет к значительному увеличению затрат, вследствие чего удельная стоимость получаемого золота будет возрастать.

ТАБЛИЦА 2. Техничко-экономические показатели извлечения золота из песков по различным технологиям, %

Продукт обогащения (содержание золота, г/м <sup>3</sup> )	Доля минеральной массы	Доля металла	Среднее содержание золота, г/м <sup>3</sup>	Извлечение золота		Относительная стоимость			Относительная прибыль*
				в конечный продукт	доля от исходного	добычи и переработки		золота, удельная	
						приведенная	удельная		
Переработка песков общим потоком на шлюзах									
Кондиционные пески (более 0.07)	100.0	100.0	0.68	74.3	74.3	100	100.0	100.0	100.0
Переработка песков общим потоком с применением многостадийной (развитой) технологии при использовании центробежных концентраторов и отсадочных машин									
Кондиционные пески (более 0.07)	100.0	100.0	0.68	93.4	93.4	130	100.0	103.4	104.2
Комбинированная переработка песков общим потоком на шлюзах и последующим кучным выщелачиванием хвостов обогащения									
Кондиционные пески (более 0.07)	100.0	100.0	0.68	74.3	74.3	100	80.0	—	—
Хвосты обогащения песков	50.2	24.2	0.33	73.4	17.8	50	20.0	—	—
Итого	—	—	—	—	92.1	—	100.0	100.5	118.7
Предлагаемая технология с селективной выемкой и раздельной переработкой песков									
Богатые пески (более 1.20)	14.9	51.2	2.340	93.4	47.8	135	17.0	—	—
Рядовые пески (0.3...1.2)	49.4	39.7	0.546	74.3	29.5	105	43.8	—	—
Бедные пески (0.07...0.30)	35.7	9.1	0.174	73.4	6.7	85	25.6	—	—
Хвосты обогащения богатых песков	7.5	3.4	0.187	73.4	2.5	50	3.2	—	—
Хвосты обогащения рядовых песков	24.7	10.2	0.264	73.4	7.5	50	10.4	—	—
Итого	—	—	—	—	94.0	—	100.0	93.5	166.9

\*При стоимости реализации золота, обеспечивающей рентабельность с добычей и последующей переработкой песков общим потоком на шлюзах на уровне 20 %

Предлагаемая технология обеспечивает наиболее высокие показатели извлечения. В процессе раздельной переработки исходных песков извлекается 84.0 % золота, а выщелачивание хвостов обогащения богатых и рядовых песков позволяет дополнительно получить еще 10.0 %. Таким образом, применение предлагаемой технологии позволит существенно увеличить полноту и комплексность использования запасов сложноструктурного выемочного блока при обеспечении приемлемых затрат.

## ВЫВОДЫ

Предлагаемая технология освоения сложноструктурных россыпных месторождений, основанная на оконтуривании запасов разного качества по сортам, применении селективной выемки и раздельной переработки разнотортных песков, обеспечивает гибкость технологического



процесса, повышает сквозное извлечение золота и снижение его удельной себестоимости. Более затратная многостадийная переработка используется для относительно небольшого объема богатых песков, содержащих основную долю металла выемочного блока, при этом бедные пески не подвергаются промывке и сразу направляются на кучное выщелачивание.

В качестве критерия эффективности отработки запасов принята максимальная прибыль, определяющая оптимальные границы содержания золота в песках с учетом его крупности и пробности, последующей переработки хвостов обогащения. Расчеты показывают, что применение раздельной переработки песков позволит на 9–10 % увеличить сквозное извлечение металла из исходных песков рассматриваемого месторождения по сравнению с традиционной переработкой минерального сырья общим потоком на шлюзах в основном за счет снижения потерь мелкого и тонкого золота. Последующее вовлечение в переработку хвостов обогащения богатых и рядовых песков дает возможность дополнительного извлечения золота.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трубецкой К. Н., Каплунов Д. Р., Викторов С. Д., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н. Научное обоснование технологий комплексного ресурсосберегающего освоения месторождений стратегического минерального сырья // ГИАБ. — 2014. — № 12. — С. 5–12.
2. Аренс В. Ж., Фазлуллин М. И., Хрулев А. С., Хчеян Г. Х. Опыт разработки погребенных многолетнемерзлых россыпей золота скважинной гидродобычей // ГИАБ. — 2019. — № 1. — С. 26–35.
3. Волченко Г. Н., Серяков В. М., Фрянов В. Н. Геомеханическое обоснование ресурсосберегающих вариантов разработки рудных месторождений системой этажного принудительного обрушения // ФТПРПИ. — 2012. — № 4. — С. 144–154.
4. Huayan Pian and Santosh M. Gold deposits of China: Resources, economics, environmental issues, and future perspectives, *Geolog. J.*, 2020, Vol. 55, No. 8. — P. 5978–5989.
5. Курленя М. В. Актуальные направления и задачи исследований освоения месторождений полезных ископаемых глубокого залегания в условиях Сибири и Дальнего Востока // ФТПРПИ. — 2021. — № 4. — С. 3–10.
6. Orimoloye I. R. and Ololade O. O. Potential implications of gold-mining activities on some environmental components: A global assessment 1990 to 2018, *Geograph. J.*, 2020, Vol. 32, No. 4. — P. 2432–2438.
7. Батугина Н. С., Гаврилов В. Л., Ткач С. М., Хоютанов Е. А. Оценка влияния особенностей строения россыпных месторождений золота на эффективность их освоения на Севере // ФТПРПИ. — 2022. — № 3. — С. 67–76.
8. Дудинский Ф. В., Тальгамер Б. Л., Мурзин Н. В. Методические основы определения производительности многочерпаковых свайных драг при разработке техногенных россыпей // ФТПРПИ. — 2022. — № 3. — С. 77–86.
9. Oberthuer T., Melcher F., and Weiser T. W. Detrital platinum-group minerals and gold in placers of southeastern Samar Island, Philippines, *Canadian Mineralogist*. 2017, Vol. 55, No. 1. — P. 45–62.
10. Verimurugan E., Shruti V. C., Jonathan M. P., Priyadarsi D. R., Sarkar S. K., Rawlins B. K., and Villegas L. E. C. Comprehensive study on metal contents and their ecological risks in beach sediments of KwaZulu-Natal province, South Africa, *Marine Pollut. Bull.* 2019, Vol. 149. — 110555.
11. Замятин О. В., Маньков В. М. Мелкое золото в россыпях: проблемы оценки и извлечения // Горн. журн. — 2011. — № 4. — С. 22–26.
12. Мирзеханов Г. С., Литвинцев В. С. Состояние и проблемы освоения техногенных россыпных месторождений благородных металлов в Дальневосточном регионе // Горн. журн. — 2018. — № 10. — С. 25–30.

13. Nafikov R. Z., Kislyakov V. E., Kirsanov A. K., and Teshaev U. R. Dredging technology at placer gold deposits in the Far North, J. Degraded and Min. Lands Management. 2023, Vol. 10, No. 2. — P. 4199–4207.
14. Ермаков С. А., Бураков А. М. Комбинирование процессов предварительной концентрации полезного компонента как основа для создания геотехнологий нового типа // ГИАБ. — 2008. — № 4. — С. 102–107.
15. Клепиков В. Н. Региональные и локальные особенности концентрации самородков золота в россыпях // Концентрация и рассеяние полезных компонентов в аллювиальных россыпях: тез. докл. — Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. — С. 24–26.
16. Ермаков С. А., Потехин А. В. Анализ применяемых способов разработки и оборудования на россыпных месторождениях Якутии // ГИАБ. — 2012. — № S7. — С. 218–224.
17. Курбатова В. В., Семькин Е. С., Голубев И. А. Депривация механизации процессов золотодобычи в условиях Северо-Востока России // Маркшейдерия и недропользование. — 2022. — № 6. — С. 23–32.
18. Анистратов Ю. И., Анистратов К. Ю., Щадов М. И. Справочник по открытым горным работам. — М.: НТЦ “Горное дело”, 2010. — 700 с.
19. Чебан А. Ю., Рассказов И. Ю., Литвинцев В. С. Анализ парка горных машин горнодобывающих предприятий Амурской области // Маркшейдерия и недропользование. — 2012. — № 2. — С. 41–50.
20. Инструкция по нормированию технологических потерь золота при промывке золотосодержащих песков на промывочных приборах / Вост. НИИ золота и редких металлов; сост. Н. П. Лавров, В. В. Милентьев, Ф. Ф. Умрихин. — Магадан: Кордис, 2004. — 19 с.
21. Рассказов И. Ю., Чебан А. Ю., Литвинцев В. С. Анализ технической оснащенности горнодобывающих предприятий Хабаровского края и Еврейской автономной области // Горн. журн. — 2013. — № 2. — С. 30–34.
22. Алексеев В. С., Серый Р. С., Соболев А. А. Повышение извлечения мелкого золота на промывочном приборе шлюзового типа // Обогащение руд. — 2019. — № 5. — С. 13–18.
23. Ghaffari A. and Farzanegan A. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modelling, Miner. Eng., 2017, Vol. 112. — P. 57–67.
24. Куликов В. И., Байбородин Б. А., Ястребов К. Л. Опыт внедрения современных технологий обогащения золотосодержащих песков на предприятиях Иркутской области // Вестник ИрГТУ. — 2003. — № 2. — С. 63–67.
25. Qiao Chen, Hong-ying Yang, Lin-lin Tong, Hui-qun Niu, Fu-sheng Zhang, and Chen G. Research and application of a Knelson concentrator: A review, Miner. Eng., 2020, Vol. 152. — 106339.
26. Ермаков С. А., Бураков А. М., Касанов И. С. Минимизация объемов переработки золотосодержащих песков россыпных месторождений Якутии по критерию предельной крупности некондиционного сырья // ГИАБ. — 2014. — № 4. — С. 138–149.
27. Бянкин М. А. Повышение эффективности разработки глубокозалегающих россыпей с “тонким” золотом // Недропользование XXI век. — 2023. — № 1-2. — С. 96–99.
28. Пат. 2678344 РФ. Способ комбинированной разработки месторождений золота из россыпей и техногенных минеральных образований / Секисов А. Г., Рассказова А. В., Богомяков Р. В., Литвинова Н. М. // Опубл. в БИ. — 2019. — № 4.
29. Фазлулин М. И., Авдонин Г. И., Смирнова Р. Н. К проблеме скважинного подземного выщелачивания золота // ГИАБ. — 2008. — № 10. — С. 207–217.
30. Чебан А. Ю., Секисов А. Г. Комбинированная технология разработки сложноструктурных глубокозалегающих россыпей золота // Вестн. МГТУ им. Г. И. Носова. — 2023. — Т. 21. — № 1. — С. 24–31.

31. Секисов А. Г., Зыков Н. В., Королев В. С. Дисперсное золото: геологический и технологический аспекты — М: Горная книга, 2012 — 224 с.
32. Ларионов В. Р., Федоров Ф. М., Матвеев А. И., Нечаев П. Б., Ларионов А. С. Технология раздельного обогащения глубоко погребенных россыпей золота реки Б. Куранах // ГИАБ. — 2012. — № 8. — С. 184–189.
33. Колпаков В. В., Неволько П. А., Фоминых П. А. Типохимизм и минеральные ассоциации самородного золота россыпей района Култуминского Au–Cu–Fe скарнового месторождения (Восточное Забайкалье) // Разведка и охрана недр. — 2023. — № 12. — С. 20–31.
34. Батугин С. А., Черный Е. Д. Теоретические основы опробования и оценки запасов месторождений. — Новосибирск: Наука, 1998. — 344 с.

*Поступила в редакцию 10/IV 2024*

*После доработки 07/V 2024*

*Принята к публикации 17/V 2024*