

УДК 622.7

**ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ
ПРИ ОБОГАЩЕНИИ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ
ГЛИНИСТЫХ РОССЫПЕЙ ХАБАРОВСКОГО КРАЯ**

**Т. Н. Александрова, А. В. Александров,
Н. М. Литвинова, Р. В. Богомяков**

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

Приведены теоретическое обоснование и результаты экспериментальных исследований гравитационно-флотационных методов извлечения тонкодисперсного золота из высокоглинистых геогенных и техногенных россыпей. Обосновано, что одним из перспективных направлений интенсификации гравитационных методов является эффективная подготовка перерабатываемого сырья. Показано, что флотация золота может успешно дополнить гравитационные процессы для повышения общего их извлечения.

Золотосодержащие россыпи, предварительная реагентная обработка, гравитация, сорбция, агломерационная флотация

ВВЕДЕНИЕ

Из россыпей в России за два последних столетия извлечено более 9 тыс. т золота, что превышает добычу рудного золота в 3 раза. Качество эксплуатируемых россыпных месторождений вследствие истощения сырьевой базы неуклонно снижается. За последние 10 лет содержание золота в песках при подземной добыче снизилось на 26 %, при открытой — на 15 % [1].

Согласно данным геологических исследований и результатам анализа эксплуатационных работ, золотоносные россыпи Дальнего Востока России содержат до 80 % глинистой фракции. На территории Хабаровского края и Еврейской автономной области высокое содержание глинистой фракции в составе рыхлых отложений золотоносного пласта и высокое содержание мелкого золота отмечается на месторождениях — р. Белая, р. Большой Кайгачан, р. Малая Нивагли, ручьях Заманчивый, Малый Киткан, Северный, Ерничный, Генриховский, Кутума [2].

Россыпи с высокой глинистостью и мелким золотом эксплуатируются в ограниченном масштабе из-за отсутствия эффективных технологий. В настоящее время разработаны базовые варианты технологий обогащения труднообогатимых золотосодержащих песков, основанные на применении гравитационных методов и отличающиеся рациональным использованием шлюзов, отсадочных машин, винтовых аппаратов, концентрационных столов, центробежных концентраторов в сочетании с оптимальными способами подготовки песков к обогащению.

Исследованиями ИГД ДВО РАН, проведенными на разнообразном минеральном и техногенном сырье, показано, что включение в технологическую схему обогащения операции предварительной реагентной обработки галогенидными соединениями в щелочной среде в большинстве случаев способствует повышению эффективности гравитационных процессов [3, 4].

Цель данной работы — теоретическое обоснование и разработка эффективных гравитационно-флотационных методов извлечения тонкодисперсного золота из высокоглинистых геогенных и техногенных россыпей.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования использовались глинистые золотосодержащие пески россыпей Хабаровского края — месторождения Колчан, Болотистый, Кремень. Наличие мелкого, очень мелкого и тонкого золота в исследуемых материалах, а также присутствие в составе рыхлых отложений большого количества труднопромывистого глинистого материала является основной причиной значительных потерь золота. По результатам исследований технологических проб золотосодержащих песков установлено высокое содержание глинистой фракции (рис. 1).

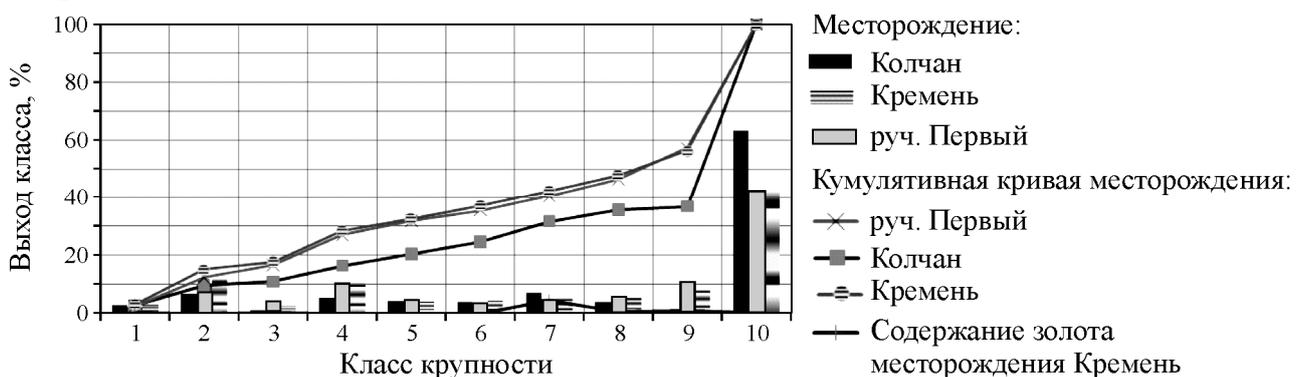


Рис. 1. Гранулометрический состав золотосодержащих песков, мм: 1 — +40; 2 — $-40 \div +10$; 3 — $-10 \div +6$; 4 — $-6 \div +2$; 5 — $-2 \div +1$; 6 — $-+0.5$; 7 — $-0.5 \div +0.2$; 8 — $-0.2 \div +0.1$; 9 — $-0.1 \div +0.071$; 10 — $-0.071 \div +0$

Анализ приведенных данных показывает, что 42–63.12 % составляет суглинок (класс $-0.071 \div +0.0$ мм). В его составе основной минерал — каолин, доля кварца не более 30 %, в незначительных количествах присутствует эпидот, лимонит и другие рудные минералы в тонкозернистой форме.

Распределение золота по классам крупности неравномерное для всех исследуемых объектов, основная доля его концентрируется в руде фракций $-2.0 \div +0.1$ и $-0.1 \div +0.071$ мм. Ситовым анализом золота, извлеченного из всех продуктов обогащения (на примере материала месторождения Колчан), установлена такая же закономерность (табл. 1). Размеры золотин > 1 мм крайне редки, на фракцию $-0.5 \div +0.2$ мм приходится 11.35 %, а остальное золото -0.1 мм и менее. Технологические исследования проводились с использованием лабораторного оборудования: отсадочной машины “Омск-2” (при частоте хода $75-80 \text{ мин}^{-1}$ и амплитуде 60 мм; расход воды поддерживался на уровне $3 \text{ м}^3/\text{ч}$), концентрационного стола СКО-0.5, центробежного концентратора “ЦБК-100, сепаратора “Knelson-3.5”, флотационной машины ФМ-2М.

Условия эксперимента по гравитационному и флотационному обогащению:

1. Навеска материала массой 3 кг поступала на первую стадию центробежной концентрации в лабораторном гидроциклоне. Песковая фракция направлялась на концентрационный стол СКО-0.5, водная суспензия — на вторую стадию центробежной концентрации с одновременной реагентной обработкой в течение 40 мин и последующей доводкой материала на концентрационном столе. Для сравнения 3 кг аналогичной пробы обрабатывались по такой же схеме без предварительной обработки реагентами.

2. Навеска материала 50 г, Т:Ж = 1:5. Расход основных реагентов: бутиловый ксантогенат калия 100 г/т, вспениватель Т-80 — 40 г/т. Для повышения эффективности флотационного процесса извлечения золота вводился растительный сорбент — 20 кг/т.

ТАБЛИЦА 1. Ситовый анализ извлеченного золота (месторождение Колчан)

Класс крупности, мм	Количество знаков	Морфологические особенности извлеченного золота
-2.0 ÷ +1.0	2	Размер: 3×1×0.5; 3×2.5×0.5 мм Форма: столбчатая и изометрическая Цвет: золотисто-желтый и желтый с черным налетом (аргентит)
-1.0 ÷ +0.5	7	Размер: 1×0.5 – 0.6×0.4 мм Форма: листовые пластинки, уплощенные зерна Цвет: золотисто-желтый, зеленовато-желтый
-0.5 ÷ +0.2	190 из них 10 сростков с кварцем	Размер: 0.3×0.2×0.1; 0.5×0.1 – 0.2; 0.3 – 0.3×0.15 мм Форма: преобладают неправильные, изометричные, удлиненно-пластинчатые, реже кубические, октаэдрические, псевдотетраэдрические Цвет: светлый, золотистый, красноватый и зеленовато-желтый
-0.2 ÷ +0.1	487	Размер: 0.2×0.1; 0.2×0.15; 0.1×0.15; 0.1×0.1 мм Форма: преобладают комковатые, слабоудлиненные изометричные, пластинчатые, лепешковидные, редко октаэдрические и кубические Цвет: светло-желтый, зеленовато-желтый, серовато-желтый и др. оттенки
-0.1 ÷ +0.05	687	Размер: 0.1×0.05; 0.1×0.1 мм Форма: изометричная, комковатая, реже приближенная к кубической и октаэдрической Цвет: светло-желтый, зеленовато-желтый
-0.005	301	Размер: 0.01×0.05 мм и менее Форма: комковатая, изометричная, пластинчатая, иногда близкая к кубу и октаэдру Цвет: светло-желтый, редко с красноватым и черным налетом
Итого	1674	

Анализ исходных материалов и продуктов обогащения проводился с применением рентгенофлуоресцентного анализатора Mobile X-50, сканирующего электронного микроскопа LEO EVO 40 HV с энергодисперсионным детектором INCA Energy 350, атомно-абсорбционного анализатора ААС-6200, лазерного анализатора крупности частиц “Анализетте 22”, стереомикроскопа Stereo Discovery V8. Статистический анализ выполнялся с использованием пакета прикладных программ STATISTICA 6.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи: теоретические исследования фактора разделения золотосодержащих суспензий и экспериментальные исследования процесса переработки труднообогатимых золотосодержащих материалов с помощью гравитационно-флотационных методов.

Задачей теоретического исследования являлось определение зависимости фактора разделения золотокварцевой смеси от условий стесненного падения и формы золотин. Для определения конечной скорости падения частиц применен метод Лященко [5] с определением критерия Рейнольдса графоаналитическим способом. Алгоритм теоретического исследования показан на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм теоретического исследования процессов гравитационного разделения: δ_s — плотность минерала, кг/м³; v — скорость осаждения, м/с; d — диаметр зерна, мм; k — коэффициент формы; Δ — плотность среды, кг/м³; μ — коэффициент динамической вязкости

Сущность метода определения конечной скорости падения частиц заключается в том, что для известных параметров зерна и среды рассчитывается параметр $Re^2 \Psi$ по формуле

$$Re^2 \Psi = \frac{\pi d^2}{6} (\delta - \Delta) g \frac{\Delta}{\mu^2}, \quad (1)$$

где d — диаметр частицы, мм; δ — плотность частицы, кг/м³; Δ — плотность среды, кг/м³; μ — вязкость среды, Н·с/м²; $Re^2 \Psi$ — приведенный параметр Рейнольдса.

Для определения параметров и коэффициентов стесненного осаждения золотокварцевых суспензий разработан алгоритм и его программная реализация на языке Delfi 7.

Результаты математического моделирования представлены в виде функциональных зависимостей скоростей осаждения от k формы, критерия Рейнольдса, диаметра частиц (рис. 3).

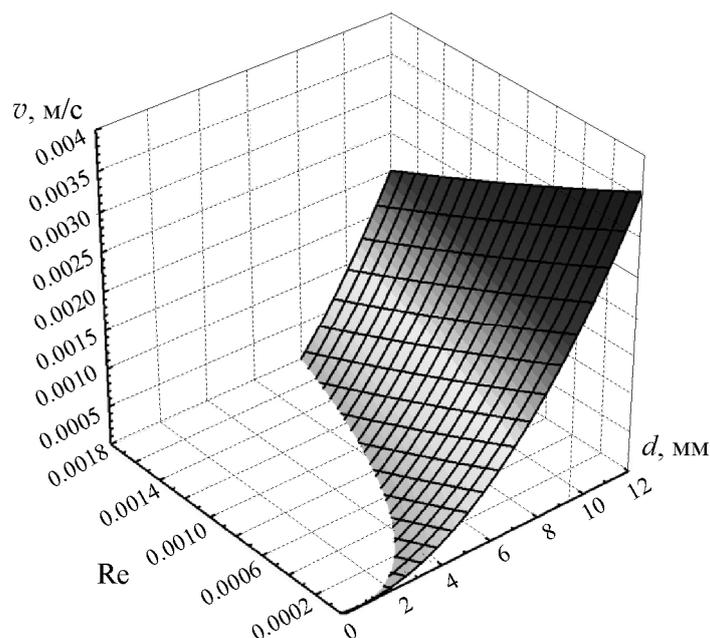


Рис. 3. Зависимость скорости осаждения от диаметра частиц и критерия Рейнольдса: v — скорость осаждения, м/с; Re — критерий Рейнольдса; d — диаметр частиц, мм

Математические выражения, приведенные ниже, позволяют прогнозировать скорость осаждения золото-кварцевых суспензий в зависимости от гидродинамического режима и вещественного состава материала:

$$v = 2.7 \cdot 10^{-5} - 4.5 \cdot 10^{-5} d - 0.84 Re + 2.8 d^2 - 0.008 d \cdot Re + 42.5 Re^2,$$

$$v = 3.2 \cdot 10^{-6} - 0.18 Re - 9.27 \cdot 10^{-6} k + 55.44 Re^2 - 0.03 Re k + 1.3 \cdot 10^{-5} k^2.$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование гравитационного процесса переработки глинистых золотосодержащих песков с предварительной обработкой материалов.

Технологические исследования гравитационного процесса переработки труднообогатимых глинистых песков золотосодержащих россыпей с использованием предварительной обработки материалов полифосфатом натрия проводились на материале класса крупности – 0.071 мм.

При реагентной обработке материала наблюдается пептизация шламов, при этом образуются хелатные комплексы со “скрытым” золотом, а поверхностный слой тонкого “плавучего” золота становится гидрофильным, в результате повышается выход золота в концентрат. Полифосфат натрия $(NaPO_3)_n \cdot Na_2O$ малотоксичен, ПДК составляет 3.5 мг/дм^3 по (PO_4^{3-}) с лимитирующим показателем вредности по органическому признаку, т. е. применяемый реагент нетоксичен и биологически разлагаем. Извлечение золота в концентрат в пробах, обработанных реагентом, повышалось по сравнению со способом без обработки реагентом от 2 до 2.2 раза [6].

В дальнейшем изучались возможности совместного влияния гексаполифосфата натрия и галогенного окислителя. Содержание золота в концентрате определялось методами математического планирования эксперимента. Обработка результатов экспериментов выполнена по общепринятой методике [7]. Исследования проводились по схеме, приведенной на рис. 4.

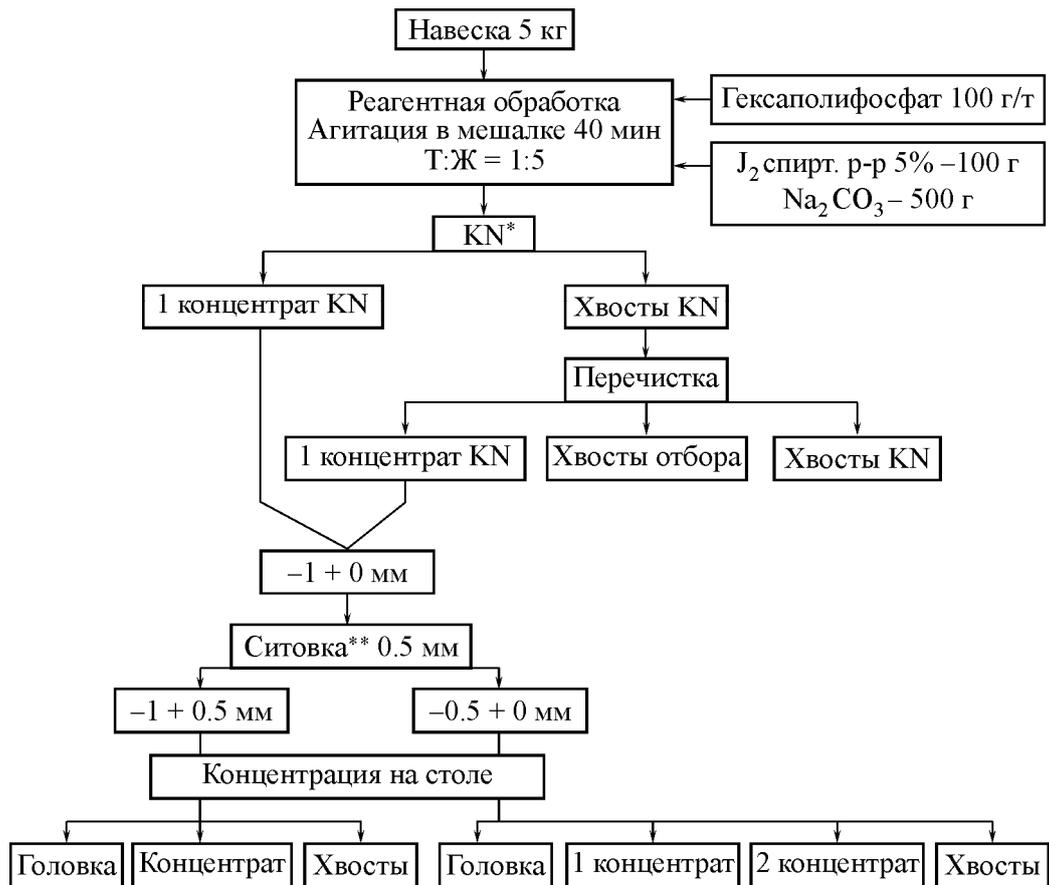


Рис. 4. Схема гравитационного обогащения золотосодержащих песков с предварительным химическим диспергированием в центробежном поле; *KN — концентрация на сепараторе “Knelson-3.5”; ** — классификация на сите 0.5 мм

Графическая интерпретация зависимости извлечения от варьируемых параметров приведена на рис. 5, уровни варьирования — в табл. 2.

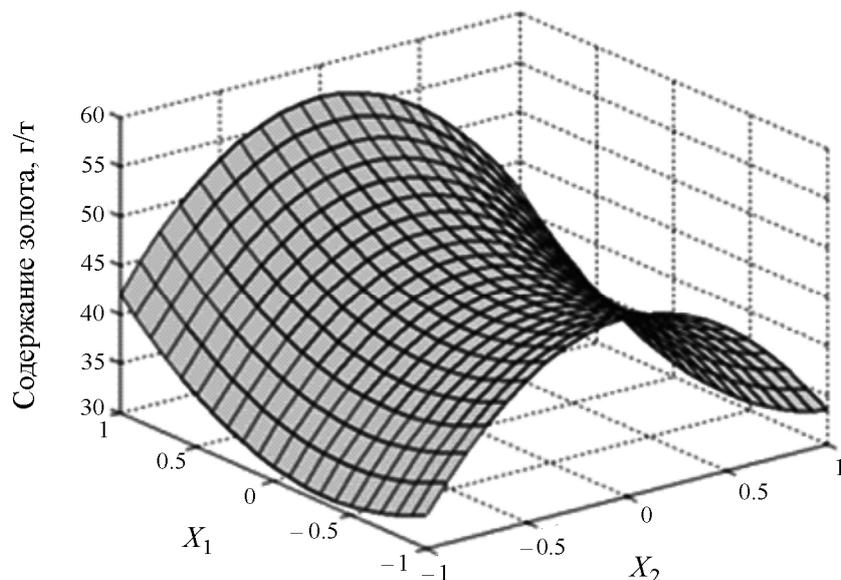


Рис. 5. Зависимость содержания золота в гравитационном концентрате (средневзвешенное значение от расхода гексаполифосфата натрия (X_2) и галогенного окислителя (X_1))

ТАБЛИЦА 2. Фактор и уровни варьирования эксперимента при химическом диспергировании

Фактор и уровни варьирования	-1	0	1
X_0 — расход Na_2CO_3 , г/т	100	300	500
X_1 — расход спиртового раствора I_2 , г/т	50	100	150
X_2 — расход гексаполифосфата натрия, г/т	50	75	100

Увеличение расхода галогенного окислителя выше 100 г/т ведет к снижению содержания золота в концентрате, что вызвано частичным растворением тонкодисперсного золота (рис. 6). Расход гексаполифосфата натрия оказывает положительное влияние на содержание золота в концентрате в исследуемом диапазоне. Это обусловлено изменением структурно-механических свойств суспензии.

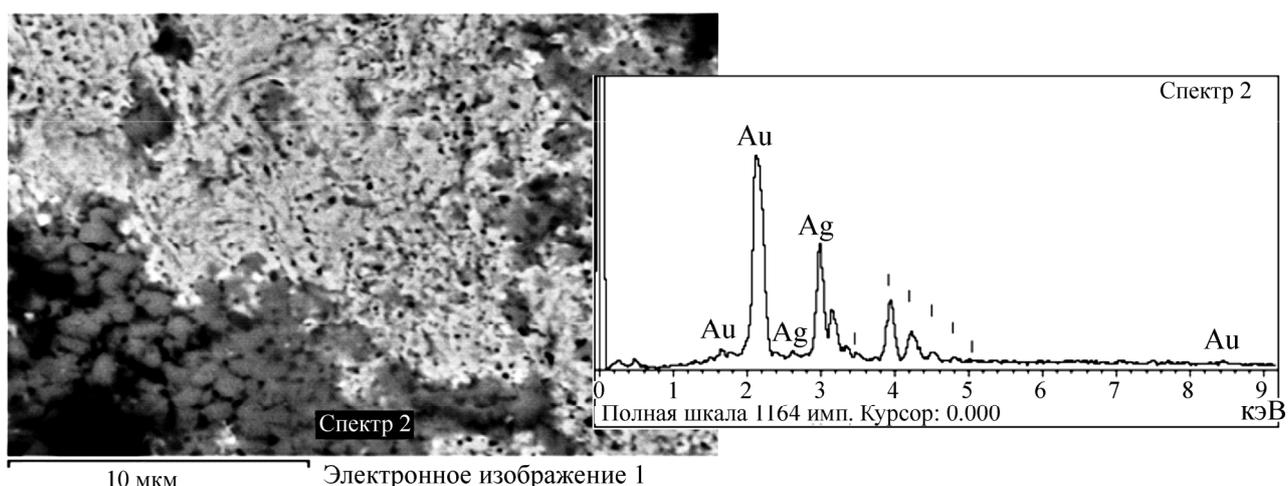


Рис. 6. Микрофотография золотины после обработки спиртовым раствором I_2 (время контакта 15 мин)

Благодаря использованию установленных оптимальных расходов реагентов, реализован схемный эксперимент по гравитационному извлечению с предварительным химическим диспергированием в центробежном поле и сравнительный эксперимент без обработки. Технологические показатели эксперимента по гравитационному извлечению с предварительным химическим диспергированием в центробежном поле приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Показатели обогащения с реагентной обработкой (навеска 5 кг)

Номер пробы	Класс крупности	Выход		ААС, г/т	Извлечение, %
		г	%		
1	-1.0 ÷ +0.5 головка стола	1.0	0.02	54.5	6.7
2	-1.0 ÷ +0.5 концентрат стола	5.5	0.11	46.2	31.3
3	Хвосты стола	16.5	0.32	0.01	0.02
		23.0	0.45		
4	-0.5 ÷ +0 головка стола	2.0	0.04	65.4	16.1
5	-0.5 ÷ +0 1 концентрат стола	2.5	0.05	39.5	12.2
6	-0.5 ÷ +0 2 концентрат стола	6.5	0.13	41.8	33.5
7	Хвосты стола	78.0	1.57	0.01	0.09
Итого хвосты КН		4889.5	97.76	0.00001	0.006
Итого класс -1.0 ÷ +0 мм		5001.5	100.0		99.9

Таким образом, средневзвешенная экстракция в концентрат по реализованной схеме составила более 90 %, что на 15–20 % выше, чем в схемном эксперименте без химического диспергирования.

Исследование флотационного процесса переработки глинистых золотосодержащих песков с применением сорбентов.

Флотация золота из золотосодержащих песков может успешно дополнять гравитационные процессы для повышения общего его извлечения. После гравитационного обогащения исходных песков с использованием концентрационных столов или отсадочных машин проводится флотационное доизвлечение тонких зерен золота, что значительно повышает его общее извлечение [8].

Использование сорбционного процесса при флотационном обогащении золотосодержащих материалов является перспективным направлением, позволяющим снизить потери тонкодисперсного золота из шламистых фракций. Для повышения гидрофобных свойств и сорбционной емкости сорбента проводилась его модификация на основе термической и химической обработки. Термообработка осуществлялась путем обжига сорбентов в муфельной печи при 160–220°C. В ходе исследований выявлено, что оптимальная температура обжига для получения гидрофобного материала 200°C. Извлечение золота во флотационный концентрат с использованием сорбента, подвергнутого термообработке при температуре 200°C, повышается на 10 %.

Химическая обработка сорбента проводилась с применением реагента на основе комплекса кислот жирного ряда: 51–57 % линолевой; 23–29 % олеиновой; 4.5–7.3 % стеариновой; 3–6 % линоленовой; 2.5–6.0 % пальмитиновой; 0.9–2.5 % арахидиновой; до 0.1 % гексадеценовой; 0.1–0.4 % миристиновой при расходе 50–200 г/т. В результате экспериментальных исследований установлен оптимальный расход комплексного реагента 50–100 г/т. На основании анализа экспериментальных данных выявлено, что химическая обработка сорбента при расходе 50–100 г/т дает прирост добычи золота на 15 %.

Таким образом, показана целесообразность использования модифицированных сорбентов для повышения качества флотационного концентрата. Применение модифицированных растительных сорбентов позволяет повысить извлечение тонкодисперсных и коллоидных частиц золота.

ВЫВОДЫ

1. Россыпи, золотоносные коры выветривания и техногенные объекты являются главными компонентами минерально-сырьевой базы России. Россыпи обеспечивали большую часть добычи золота в течение двух последних веков. В настоящее время илонакопители, эфельные и дражные отвалы, образовавшиеся при их разработке, — важный резерв золотосодержащего сырья. Месторождения коры выветривания, по существующим оценкам, будут обеспечивать основную часть прироста минерально-сырьевой базы золота в XXI в. Гранулометрический состав золота и его распределение во многих техногенных образованиях неблагоприятны для обогащения гравитационными методами, что приводит к низкому извлечению, потерям тонкого и мелкого золота.

2. Разработанный метод интерпретации гранулометрических характеристик с использованием созданного программного обеспечения позволяет повысить точность седиментационного анализа и прогнозировать морфологию золота. На основе экспериментально-теоретических исследований выявлено, что выделяемые при седиментационном осаждении фракции микронной

крупности необходимо рассматривать как комплексную полидисперсную среду, в которой соотношения размеров слагающих частиц представляют функциональную зависимость размерных, плотностных и морфологических особенностей частиц.

3. Обосновано, что одним из перспективных направлений интенсификации гравитационных методов является эффективная подготовка, в том числе химическое диспергирование песков перед гравитационным извлечением. Изучение совместного влияния гексаполифосфата натрия и галогенного окислителя на эффективность обогащения позволило установить, что сочетание циклов “пептизация – коагуляция” повышает экстракцию золота.

4. Показано, что флотация золота может успешно дополнять гравитационные процессы и повышать общее его извлечение. Применение модифицированных растительных сорбентов при флотационном обогащении дает возможность извлекать тонкодисперсные и коллоидные частицы золота.

Таким образом, эффективная добыча золота из россыпных месторождений возможна при комплексном подходе к данной проблеме: с одной стороны, систематизация данных исследований по вещественному составу золотоносных песков, выявление основных закономерностей извлечения тонкодисперсного золота из глинистых россыпей, с другой — создание способов интенсификации извлечения тонкого золота на основе новых технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беневольский Б. И., Голенев В. Б., Быховский Л. З. и др. Динамика развития минерально-сырьевой базы россыпей и кор выветривания в постсоветское время // Минеральные ресурсы России. — 2011. — № 5.
2. Сорокин А. П., Ван-Ван-Е., Глотов В. Д. и др. Атлас основных золотороссыпных месторождений юга Дальнего Востока и их горно-геологические модели. — Владивосток, Благовещенск, Хабаровск: ДВО РАН, 2000.
3. Патент № 2233342 РФ. Способ извлечения золота при обогащении минерального сырья / В. В. Гостищев, Н. М. Литвинова, Л. Н. Шокина // Оpubл. в БИ. — 2004. — № 21.
4. Александрова Т. Н., Литвинова Н. М., Богомяков Р. В. К вопросу извлечения мелкодисперсного золота из песков россыпных месторождений // ГИАБ. — 2011. — № 2.
5. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. — М.: Альянс, 2006.
6. Патент № 2388546 РФ. Способ извлечения тонкодисперсного золота при обогащении золотосодержащих песков россыпных месторождений / Т. Н. Александрова, И. Ю. Рассказов, Н. М. Литвинова, Р. В. Богомяков // Оpubл. в БИ. — 2010. — № 13.
7. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Т. 2: Методы планирования эксперимента / пер. с англ. — М.: Мир, 1981.
8. Польшкин С. И. Обогащение руд и россыпей редких и благородных металлов — М.: Недра, 1987.

Поступила в редакцию 2/VII 2012