УДК 622.7

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГРАВИТАЦИОННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ МЕЛКОГО И ТОНКОГО ЗОЛОТА ИЗ РОССЫПЕЙ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА

Т.Н.АЛЕКСАНДРОВА, *д-р техн. наук, доцент, IGD@ rambler.ru*
В.Б.КУСКОВ, *канд. техн. наук, доцент, opikvb@mail.ru*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

Дано обоснование и результаты экспериментальных исследований по повышению эффективности гравитационного извлечения мелкого и тонкого золота из высокоглинистых геогенных и техногенных россыпей, а также аллювиальных россыпей. В качестве объектов исследования использовались глинистые золотосодержащие пески россыпей Хабаровского края, в которых наличие мелкого и тонкого золота, а также присутствие в составе рыхлых отложений большого количества труднопромывистого глинистого материала является основной причиной значительных потерь золота. Другим объектом исследований были россыпи Красноярского края. Разработан метод интерпретации гранулометрических характеристик с использованием созданного программного обеспечения, который позволяет повысить точность седиментационного анализа и прогнозировать морфологию золота. 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 извлечение золота. Показана возможность получения черновых концентратов из аллювиальных россыпей на концентрационных столах различных конструкций. Показано, что использование новой конструкции дискового концентрационного стола позволяет повысить технологические показатели по сравнению с плоскими качающимися столами.

***Ключевые слова*:** золотосодержащие россыпи, золото, пептизация, коагуляция, гравитация, концентрационные столы, осаждение.

Введение. Проблема извлечения мелкого золота и платины из песков возникла с началом промышленного освоения россыпей. 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 % [2].

Россыпи с высокой глинистостью и мелким золотом эксплуатируются в ограниченном масштабе из-за отсутствия технологически эффективных технологий. В настоящее время разработаны базовые варианты технологий обогащения труднообогатимых золотосодержащих песков, основанные на применении в основном гравитационных методов и отли-

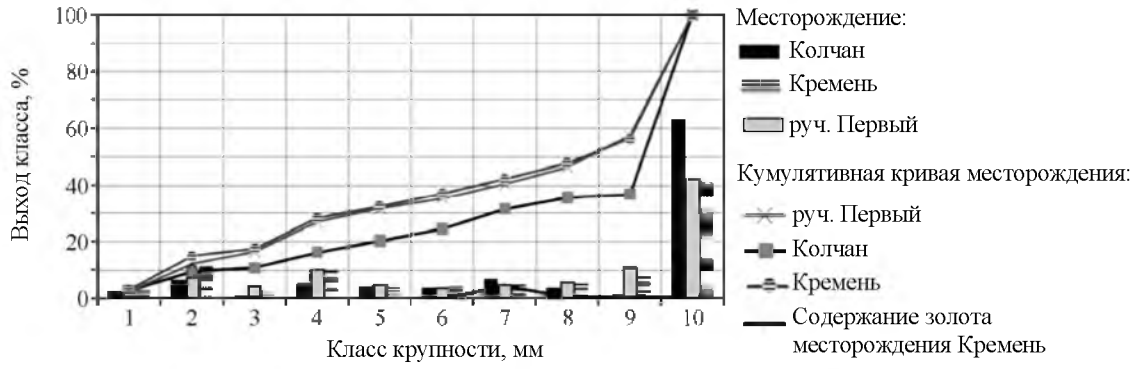


Рис.1. Гранулометрический состав золотоносных песков, мм:
+40 (1); –40+10 (2); –10+6 (3); –6+2 (4); –2+1 (5); –1+0,5 (6); –0,5+0,2 (7); –0,2+0,1 (8); –0,1+0,071 (9); –0,071+0 (10)

чающиеся рациональным использованием шлюзов, отсадочных машин, винтовых аппаратов, концентрационных столов, центробежных концентраторов в сочетании с оптимальными способами подготовки песков к обогащению. Под мелким понимают золото такой крупности, при которой оно не улавливается на существующем уровне техники и технологии обогащения.

Исследования, проведенные на разнообразном минеральном и техногенном сырье, показали, что включение в технологическую схему обогащения операции предварительной реагентной обработки галогенидными соединениями в щелочной среде в большинстве случаев способствует повышению эффективности гравитационных процессов [1, 7, 8].

Цель данной работы – теоретическое обоснование и разработка методов повышения эффективности гравитационного 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, а также россыпи Красноярского края. 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 золотоносных песков установлено высокое содержание глинистой фракции (рис.1).

Анализ приведенных данных показывает, что 42 – 63,12 % составляет суглинок (класс –0,071+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+0,1 и –0,1+0,071 мм. Ситовым анализом золота, извлеченного из всех продуктов обогащения (на примере материала месторождения Колчан), устанавливается такая же закономерность (табл.1). Размеры золотин > 1 мм крайне редки, на фракцию –0,5+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» (частота хода 75-80 мин$^{-1}$, амплитуда 60 мм; расход воды 3 м^3/ч), концентрационного стола 30-КЦ, центробежного концентратора «ЦБК-100», сепаратора «Knelson-3.5».

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 другие 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	

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, расход сорбента – 20 кг/т. Для повышения эффективности флотационного процесса извлечения золота вводился растительный сорбент.

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 обсуждения. 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.

Задача теоретического исследования – определение зависимости фактора разделения золотокварцевой смеси от условий стесненного падения и формы золотин. Для определения конечной скорости падения частиц применен метод Лященко с определением критерия Рейнольдса графоаналитическим способом. Алгоритм теоретического исследования показан на рис.2 [8].



Рис.2. Алгоритм теоретического исследования процессов гравитационного разделения: $\delta_э$ – плотность минерала, кг/м^3; v – скорость осаждения, мм; d – диаметр зерна, мм; k – коэффициент формы; Δ – плотность среды, кг/м^3; μ – коэффициент динамической вязкости

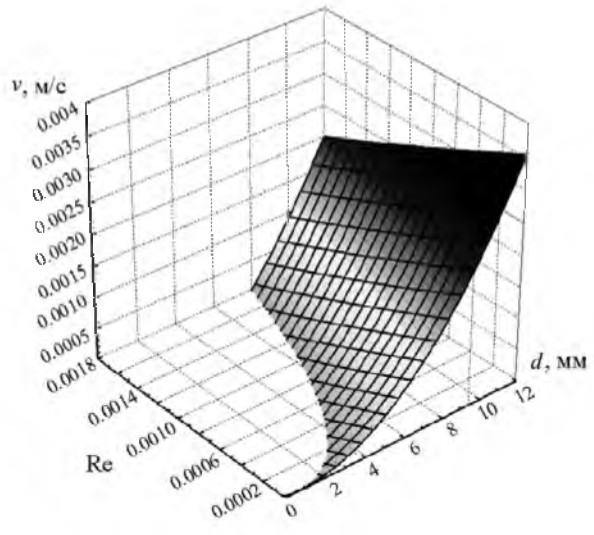


Рис.3. Зависимость скорости осаждения от диаметра частиц и критерия Рейнольдса

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

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

где d – диаметр частицы, мм; δ – плотность частицы, кг/м^3; Δ – плотность среды, кг/м^3; μ – вязкость среды, Н·с/м^2.

Для определения параметров и коэффициентов стесненного осаждения золото-кварцевых 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).

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

$$v = 2{,}7\cdot10^{-5} - 4{,}5\cdot10^{-5}d - 0{,}84\,Re +$$
$$+ 2{,}8d^2 - 0{,}008d\cdot Re + 42{,}5\,Re^2;$$

$$v = 3{,}2\cdot10^{-6} - 0{,}18Re - 9{,}27\cdot10^{-6}K_ф +$$
$$+ 55{,}44\,Re^2 - 0{,}03\,Re\,K_ф + 1{,}3\cdot10^{-5}K_ф^2.$$

Экспериментальные исследования. 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. Извлечение золота в концентрат в пробах, обработанных реагентом, возрастало от 2 до 2,2 раза в отличие от способа без обработки реагентом [1].

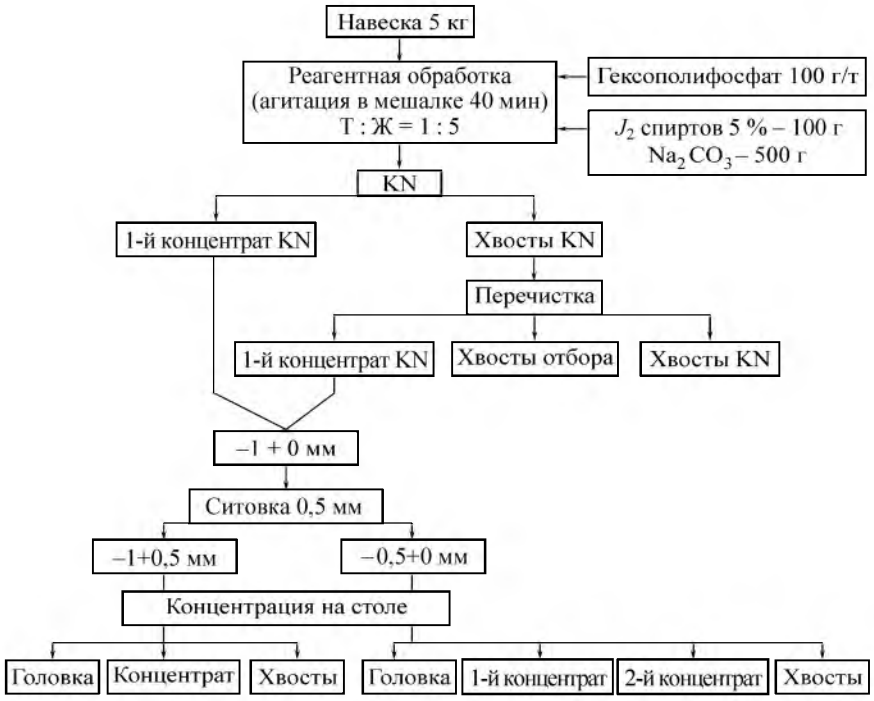


Рис.4. Схема гравитационного обогащения золотосодержащих песков с предварительным химическим диспергированием в центробежном поле

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.

Графическая интерпретация зависимости извлечения от варьируемых параметров приведена на рис.5. Фактор и уровни варьирования эксперимента при химическом диспергировании:

	Уровни варьирования		
Фактор	–1	0	1
X_0 – расход Na_2HCO_3, г/т	100	300	500
X_1 – расход спиртового раствора J_2, г/т	50	100	150
X_2 – расход гексаполифосфата натрия, г/т	50	75	100

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

Использование установленных оптимальных расходов реагентов позволило реализовать схемный эксперимент по гравитационному извлечению с предвари-

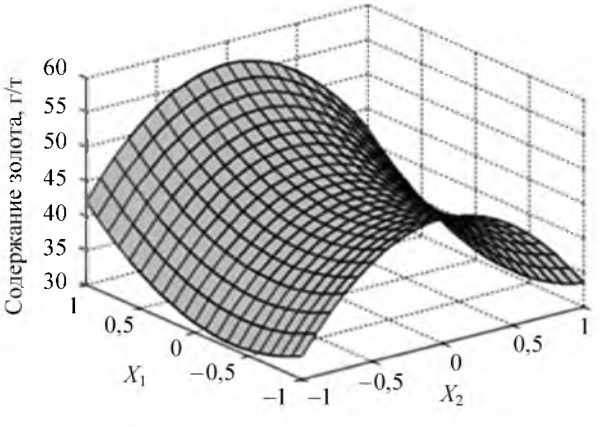


Рис.5. Зависимость содержания золота в гравитационном концентрате (средневзвешенное значение от расхода гексаполифосфата натрия (X_2) и галогенного окислителя (X_1))

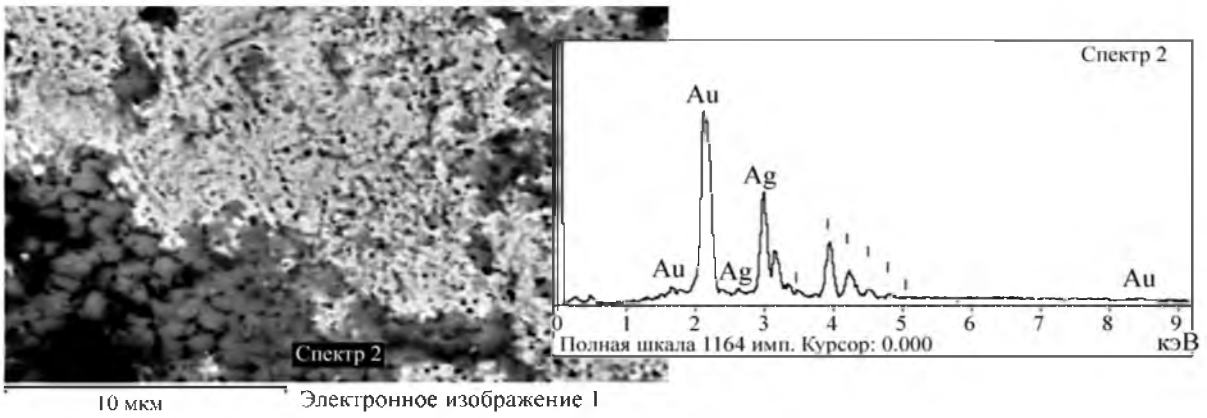


Рис.6. Микрофотография золотины после обработки спиртовым раствором (время контакта 15 мин)

тельным химическим диспергированием в центробежном поле и сравнительный эксперимент без обработки (табл.2).

Таблица 2

Показатели обогащения с реагентной обработкой (навеска 5 кг)

Номер пробы	Класс крупности, мм	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
	Σ	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 KN		4889,5	97,76	0,00001	0,006
Итого класс –1,0+0 мм		5001,5	100,0		99,9

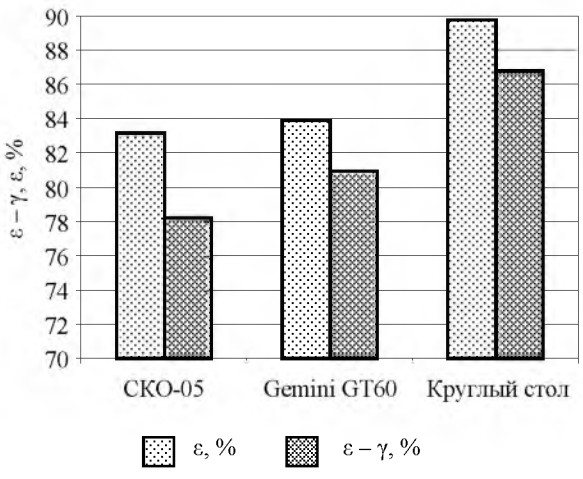


Рис.7 Зависимость критерия ε – γ и ε от типа концентрационного стола

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

Также были проведены сравнительные испытания по обогащению на различных видах концентрационных столов на золотосодержащих россыпях, на драге № 230 ЗАО «Прииск Удерейский». Драга отрабатывает россыпное месторождение в пойме реки Большая Пенченга Мотыгинского района.

Для выявления возможности непосредственного разделения исходной руды было произведено обогащение на выделенном классе – 0,5 мм исходных песков (табл.3).

Таблица 3

Гранулометрический состав песков

Класс крупности, мм	Золотосодержащая руда	
	Выход класса, %	Распределение золота от руды, г/т
–0,5+0,2	32,54	0,32
–0,2+0,1	22,37	0,75
–0,1+0,074	14,12	1,09
–0,074+0,063	8,93	2,20
–0,063+0,050	8,47	3,23
–0,050+0,040	6,44	2,43
–0,040+0	7,13	0,56
Итого	100,00	10,58

Сравнительные испытания проводились на столах СКО-0,5, Gemini GT60 и экспериментальном образце дискового вращающего концентрационного стола [4-6].

Предварительно для каждого вида стола подбирались режимы работы: для стола СКО-0,5 – частота и амплитуда колебаний деки, продольный и поперечный наклон деки, расход воды; для стола Gemeni GT60 – только амплитуда колебаний деки и расход воды; для круглого стола – скорость вращения деки, длительность противохода деки и расход воды.

Показатели обогащения на различных видах столов приведены в табл.4 и на рис.7.

Таблица 4

Показатели обогащения на различных столах

Тип стола	Выход концентрата γ, %	Содержание β, г/т	Извлечение ε, %	$\varepsilon - \gamma$, %
СКО-05	4,92	178,32	83,16	78,24
Gemini GT60	3,01	294,42	83,92	80,91
Круглый стол	2,97	319,38	89,74	86,77

Испытания показали возможность получения черновых концентратов на концентрационных столах, причем лучшие результаты получены на дисковом концентрационном столе.

Выводы

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.

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 полидисперс-

ную среду, в которой соотношения размеров слагающих частиц представляют функциональную зависимость размерных, плотностных и морфологических особенностей частиц.

Проведены сравнительные испытания по обогащению на различных видах концентрационных столов песков золотосодержащих россыпей. Испытания показали возможность получения черновых концентратов. Причем лучшие результаты были получены при обогащении на новом виде дискового концентрационного стола.

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.

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Александрова Т.Н.* К вопросу извлечения мелкодисперсного золота из песков россыпных месторождений / Т.Н.Александрова, Н.М.Литвинова, Р.В.Богомяков // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 2. С.319-323.

2. Динамика развития минерально-сырьевой базы россыпей и кор выветривания в постсоветское время / Б.И.Беневольский, В.Б.Голенев, Л.З.Быховский // Минеральные ресурсы России. 2011. № 5. С.3-10.

3. *Джонсон Н.* Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Т.2. Методы планирования эксперимента: Пер. с англ. / Н.Джонсон, Ф.Лион. М.: Мир, 1981. 610 с.

4. *Кусков В.Б.* Повышение эффективности разделения частиц за счет использования новых конструкций концентрационных столов / В.Б.Кусков, Я.В.Кускова // Записки Горного института. 2012. Т.196. С.132-135.

5. *Кусков В.Б.* Испытания концентрационных столов различных типов / В.Б.Кусков, Я.В.Кускова, К.Е.Ананенко // Цветные металлы. 2012. № 10. С.28-32.

6. Патент № 2438789 РФ. Дисковый концентрационный стол / В.Б.Кусков, Я.В.Кускова. Опубл. 10.01.2012. Бюл. № 1.

7. 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. Опубл. 10.05.2010. Бюл. № 13.

8. *Alexandrova T.N., Alexandrov A.V., Litvinova N.M., Bogomyakov R.V.* Basis and development of gold loss reduction methods in processing gold-bearing clays in the Khabarovsk territory // Journal of Mining Science. 2013. Vol.49. N 2. P.319-325.

REFERENCES

1. *Aleksandrova T.N., Litvinova N.M., Bogomjakov R.V.* K voprosu izvlechenija melkodispersnogo zolota iz peskov rossypnyh mestorozhdenij (*The issue of fine gold extraction from alluvial placers*). Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'. 2011. N 2, p.319-323.

2. *Benevol'skij B.I., Golenev V.B., Byhovskij L.Z.* Dinamika razvitija mineral'no-syr'evoj bazy rossypej i kor vyvetrivanija v postsovetskoe vremja (*Dynamics of the development of the mineral basis of placers and weathering crusts in the post-Soviet era*). Mineral'nye resursy Rossii. 2011. N 5, p.3-10.

3. *Dzhonson N., Lion F.* Statistika i planirovanie jeksperimenta v tehnike i nauke. Vol.2. Metody planirovanija jeksperimenta (*Statistics and experimental design in engineering and science. Vol.2. Methods of experimental design*). Moscow: Mir, 1981, p.610.

4. *Kuskov V.B., Kuskova Ja.V.* Povyshenie jeffektivnosti razdelenija chastic za schet ispol'zovanija novyh konstrukcij koncentracionnyh stolov (*Efficiency improvement of particle separation by using a new design of concentration tables*). Zapiski Gornogo instituta. 2012. Vol.196, p.132-135.

5. *Kuskov V.B., Kuskova Ja.V., Ananenko K.E.* Ispytanija koncentracionnyh stolov razlichnyh tipov (*Testing different types of concentration tables*). Cvetnye metally. 2012. N 10, p.28-32.

6. *Kuskov V.B., Kuskova Ja.*V. Diskovyj koncentracionnyj stol (*Round concentration table*). Patent N 2438789 RF. Publ. 10.01.2012. Bul. N 1.

7. *Aleksandrova T.N., Rasskazov I.Ju., Litvinova N.M., Bogomjakov R.V.* Sposob izvlechenija tonkodispersnogo zolota pri obogashhenii zolotosoderzhashhih peskov rossypnyh mestorozhdenij (*The method of fine gold extraction in processing gold-bearing placers*). Patent N 2388546 RF. Publ. 10.05.2010. Bul. N 13.

8. *Alexandrova T.N., Alexandrov A.V., Litvinova N.M., Bogomyakov R.V.* Basis and development of Gold Loss Reduction methods in processing Gold-Bearing Clays in the Khabarovsk Territory. Journal of Mining Science. 2013. Vol.49. N 2, p.319-325.

THE DEVELOPMENT OF METHODS FOR INCREASING THE EFFICIENCY FACTOR OF GRAVITATION EXTRACTION FOR FINE AND ULTRAFINE GOLD FROM DIFFERENT GENESIS PLACERS

T.N.ALEXANDROVA, *Dr. of Engineering Science, Associate Professor, IGD@ rambler.ru*
V.B.KUSKOV, *PhD in Engineering Science, Associate Professor, opikvb@mail.ru*
National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia

The basis for and results of experimental studies for increasing the efficiency factor of gravitation extraction for fine and ultrafine gold from geogenic and man-made mineral formations with high clay content as well as alluvial placers are presented. The clayey gold-bearing placers of the Khabarovsk region in Russia's Far East were used as the subject of research. These placers contain a substantial amount of fine particle gold and muddy material with hard washability, which are the main reasons for gold losses. One more object of research is a placer located in the Krasnoyarsk region, east Siberia. A special method of interpretation has been created for particle size distribution, using newly developed software which can increase the accuracy of sedimentation analysis and predict the morphology of gold. It has been proved that one of the most promising ways in which to intensify the gravity processes can be effective preparation, including the chemical dispersion of gold dust before gravitational processing. Exploring the joint effect of sodium hexapolyphosphate and halogen oxidant on the efficiency of processing revealed that the combination of the peptization-coagulation cycles improves gold recovery. Also, the possibility of using concentration tables with various designs for production of rough concentrate is shown. The use of a new round disk concentrated table design enables metallurgical results to be improved in comparison with shaking tables.

***Key words*:** gold-bearing placers, gold, peptization, coagulation, gravity processing, concentrating tables, sedimentation.