



ISSN 0202-3776

ОБОГАЩЕНИЕ РУД

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. ИЗДАЕТСЯ С 1956 ГОДА

ИССЛЕДОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ
ДЕПРЕССОРОВ ШЛАМОВ ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ
КАЛИЙНЫХ РУД

РАЗРАБОТКА ФЛОТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ
ОБОГАЩЕНИЯ УПОРНОЙ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕЙ
РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АКТОБЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ НА ПАРАМЕТРЫ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ

РАЗРАБОТКА ПЫЛЕПОДАВИТЕЛЬНОГО СОСТАВА
ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ
ТЕМПЕРАТУР

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОГАЩЕНИЯ
ГИДРОМИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ЗА СЧЕТ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОСАЖДЕНИЯ
МАКРОКОМПОНЕНТОВ ИЗ РАССОЛОВ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1956 году.
Издается один раз в 2 месяца.
Санкт-Петербург

Зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий
и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор), ПИ № ФС77-51322
от 19 октября 2012 г.

УЧРЕДИТЕЛИ

АО «Механобр инжиниринг»
Научно-производственная корпорация
«Механобр-техника» (АО)
ФГАОУВО «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСиС»
АО «Издательский дом
«Руда и Металлы»
При участии ИПКОН РАН
и Государственного Эрмитажа

Журнал «Обогащение руд» по решению
ВАК Министерства науки и высшего
образования РФ включен в «Перечень
рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы
основные научные результаты
диссертаций на соискание ученой
степени кандидата наук, на соискание
ученой степени доктора наук»
по следующим научным специальностям:
2.6.2. Металлургия черных, цветных
и редких металлов,
2.8.8. Геотехнология, горные машины,
2.8.9. Обогащение полезных ископаемых.

© Оформление. АО «Издательский дом
«Руда и Металлы», «Обогащение руд», 2024.

Товарный знак и название «Обогащение руд»
являются исключительной собственностью
ИД «Руда и Металлы».

Подписные индексы:
10344 (ОК «Пресса России»)
Цена свободная

ОБОГАЩЕНИЕ РУД

Б[414] 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОГАТИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ

- Барменшинова М. Б., Мотовилов И. Ю., Омар Р. С.,
Адилжан Ж.** Разработка флотационной технологии обогащения
упорной золотосодержащей руды месторождения Актобе.....3
- Конобеевских А. В., Титков С. Н., Алиферова С. Н., Телешев Д. К.**
Исследование и внедрение новых депрессоров шламов
для обогащения калийных руд.....8
- Пелевин А. Е.** Динамика движения частиц при электрической
сепарации.....12
- Тюкин А. П.** Исследование влияния физических свойств твердых
частиц на параметры газодинамической сепарации.....19

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЫРЬЯ

- Зелинская Е. В., Шадрюнова И. В., Орехова Н. Н., Барахтенко В. В.**
Повышение эффективности обогащения гидроминерального сырья
за счет предварительного осаждения макрокомпонентов из рассолов....25

ПЕРЕРАБОТКА ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

- Фомин А. В., Митрофанова Г. В., Черноусенко Е. В.**
Разработка и обоснование комбинированной технологии
комплексной переработки лопаритовых хвостов
с получением нефелинового и лопаритового концентратов.....32

ПРИРОДООХРАННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

- Зырянова О. В., Иванова Е. В., Герасимов А. М.**
Разработка пылеподавительного состава для работы в условиях
отрицательных температур.....40
- Рылов К. А., Тютрин А. А., Немчинова Н. В., Бурдонов А. Е.**
Исследование сгущения и фильтрации хвостов сульфидной
флотации.....47

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Никитин Р. М., Лукичев С. В., Опалев А. С., Бирюков В. В.**
Адаптивная модель технологической схемы обогащения горно-
обогажительного предприятия на основе технологии машинного
обучения.....54

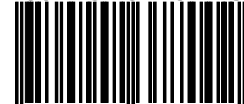
Юбилей

- Алексею Евгеньевичу Пелевину — 60.....53

Реклама

- НПК «Механобр-техника».....2 (обл.)
- Mining World Russia. 29-я Международная выставка машин и оборудования
для добычи, обогащения и транспортировки полезных ископаемых.....3 (обл.)
- Уголь России и майнинг. XXXIII Международная специализированная
выставка технологий горных разработок.....4 (обл.)
- ТК ИД «Руда и Металлы».....31, 39
- Перечень статей, опубликованных в журнале в 2024 году.....59, 60

ISSN 0202-3776



9 770202 377002 >

OBOGASHCHENIE RUD

Mineral Processing Journal

Founded in 1956. Issued every two months

CONTENTS

BENEFICIATION PROCESSES

- Barmenshinova M. B., Motovilov I. Yu., Omar R. S., Adilzhan Zh.**
Development of flotation technology for processing refractory gold-bearing ores from the Aktobe deposit.....3
- Konobeevskikh A. V., Titkov S. N., Aliferova S. N., Teleshev D. K.**
Research and implementation of novel sludge depressants for potash ore processing.....8
- Pelevin A. E.** Dynamics of particle motion during electrical separation.....12
- Tyukin A. P.** Study of the influence of physical properties of solid particles on gas-dynamic separation parameters.....19

COMPLEX RAW MATERIAL UTILIZATION

- Zelinskaya E. V., Shadrunkova I. V., Orekhova N. N., Barakhtenko V. V.** Enhancing the efficiency of hydromineral raw material processing through preliminary precipitation of macrocomponents from brines.....25

SECONDARY RAW MATERIAL PROCESSING

- Fomin A. V., Mitrofanova G. V., Chernousenko E. V.** Development and justification of a combined technology for the comprehensive processing of loparite tailings to produce nepheline and loparite concentrates.....32

ENVIRONMENT PROTECTION TECHNOLOGY

- Zyryanova O. V., Ivanova E. V., Gerasimov A. M.** Development of a dust suppressant formulation for use in sub-zero temperatures.....40
- Rylov K. A., Tyutrin A. A., Nemchinova N. V., Burdonov A. E.** Study of the thickening and filtration of sulphide flotation tailings.....47

AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

- Nikitin R. M., Lukichev S. V., Opalev A. S., Biryukov V. V.** Adaptive models of process flow charts for mining and processing plants using machine learning technology.....54

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Аксенова Г. Я., канд. геол.-минерал. наук,
Александрова Т. Н., член-кор. РАН,
Арсентьев В. А., д-р техн. наук,
Бажин В. Ю., д-р техн. наук, проф.,
Баранов В. Ф., д-р техн. наук,
Блехман Л. И., канд. техн. наук,
Бричкин В. Н., д-р техн. наук, проф.,
Воробьев А. Г., д-р экон. наук, проф.,
Герасимов А. М., канд. техн. наук,
Карапетян К. Г., д-р техн. наук, доцент,
Кибирев В. И., канд. техн. наук,
Котова О. Б., д-р геол.-минерал. наук,
Максимов И. И., д-р техн. наук, проф.
(председатель редсовета),
Маякова Е. А. (зав. редакцией),
Михайлова Н. В., канд. техн. наук,
Петров С. В., канд. геол.-минерал. наук,
Пелевин А. Е., д-р техн. наук, доцент,
Рябой В. И., д-р техн. наук, проф.,
Сазонов К. Г. (главный редактор)
Таранов В. А., канд. техн. наук,
Титков С. Н., канд. техн. наук,
Устинов И. Д., д-р хим. наук,
(зам. главного редактора),
Чантурия В. А., академик РАН,
Чантурия Е. Л., д-р техн. наук, проф.
(зам. главного редактора),
Шендерович Е. М., канд. техн. наук,
Шехирев Д. В., канд. техн. наук,
Юнгмейстер Д. А., д-р техн. наук, проф.,
Юшина Т. И., канд. техн. наук
(зам. председателя редсовета).
Иностранные члены редсовета:
Вутов Ц., д-р, проф. (Болгария),
Довнорович С., д-р (Польша),
Ёнал Г., проф. (Турция),
Пилов П. И., д-р техн. наук, проф.
(Украина).

Редактор *И. Н. Сапрыкина*

Адрес редакции:
199106, Санкт-Петербург, 22 линия, 3.
Телефон/факс: (812) 324 89 45.
E-mail: or@rudmet.ru
Internet: http://www.rudmet.ru

Издатель: Издательский дом «Руда и Металлы», 119049, Москва, Ленинский пр., д. 6, стр. 2, офис 622.

На 1-й странице обложки — работа
белорецкого фотохудожника
Сергея Михайловича Перепелкина.



РАЗРАБОТКА ФЛОТАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ УПОРНОЙ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕЙ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АКТОБЕ

М. Б. БАРМЕНШИНОВА, И. Ю. МОТОВИЛОВ, Р. С. ОМАР, Ж. АДИЛЬЖАН
(Satbayev University, г. Алматы, Республика Казахстан)*

Приведены результаты технологических исследований на обогатимость ранее не изученной малосульфидной золотосодержащей руды месторождения Актобе (Казахстан). При отработке режима флотации изучено влияние параметров на степень извлечения золота во флотоконцентрат, таких как: крупность измельчения, реагентный режим, время флотации, тип флотационной машины. В выбранном реагентном режиме проведены замкнутые опыты с одной и двумя перечистными операциями. Установлено, что по схеме с одной перечисткой извлечение золота в концентрат выше на 1,14 % и составило 89,84 %. Полученное содержание золота в концентрате перечистной флотации – 23,01 г/т, что соответствует его дальнейшей переработке гидрометаллургическими методами.

Ключевые слова: золото, флотация, фазовый анализ, собиратели, флотационные машины, концентрат, извлечение.

DOI: 10.17580/or.2024.06.01

Введение

В настоящее время мировая золотодобывающая отрасль в связи с истощением легкообогатимых ресурсов вынуждена осваивать технологии переработки упорного золотосодержащего сырья, характеризующегося тонкой дисперсией золота в сульфидных минералах, что затрудняет осуществление прямого цианирования. Обогащение упорных золотосодержащих руд можно производить по разным технологическим схемам, на выбор которых влияет множество факторов. Основными из них являются: химический состав исходной руды, форма нахождения и характер распределения золота в ней, свойства сопутствующих минералов, с которыми ассоциировано золото, присутствие других компонентов, затрудняющих обогащение [1, 2].

Современный опыт переработки упорных золотосодержащих руд базируется на использовании флотационных и комбинированных гравитационно-флотационных технологий с цианированием золотосодержащих концентратов [3–6].

Флотация золота является ключевым процессом в золотодобывающей промышленности, играя центральную роль в обогащении золотосодержащих руд. Одним из основных элементов этого процесса являются флотационные реагенты, которые обеспечива-

ют эффективное отделение золота от пустой породы и других минералов [7–11]. В последние десятилетия наблюдается рост интереса к разработке новых реагентов, которые могут повысить эффективность и экономичность процесса флотации [12].

Одним из природных источников упорных золотосодержащих руд является месторождение Актобе, разведанное в 2017 г. компаниями Mynaral Gold и Mynaral Resources, с запасами 4,7 т золота по системе JORC, которое находится в Жамбылской обл. Мойынкумского р-на и входит в Мынаральское рудное поле [13].

Данная статья посвящена созданию флотационной технологии обогащения упорной золотосодержащей руды месторождения Актобе с целью ее рациональной переработки.

Объект и методы исследования

Изучение вещественного состава и гравитационной обогатимости проб руды месторождения Актобе [13, 14] показало, что: основными вмещающими минералами в них является кварц, также присутствуют калиевый полевой шпат, кальцит и слюда; рудные минералы представлены пиритом (до 6 % мас.), лимонитом (до 0,5 % мас.), галенитом (0,15–0,2 % мас.), сфалеритом (0,17–0,2 % мас.); вредные примеси в виде мышьяка и сурьмы практически отсутствуют, содержание меди минимально; исследованием под микроскопом установлено [15], что руда представлена гнездово-вкрапленными агрегатами галенит-сфалерит-пиритового состава. Основной рудный минерал пирит наблюдается в виде ангедральных сростков и вкрапленности, отдельных идиоморфных зерен размером от 0,02 до 1,5 мм в сростании со сфалеритом и галенитом, развивающимся в основном по

* Барменшинова Мадина Богембаевна — зав. кафедрой, канд. техн. наук, ассоциированный профессор, m.barmenshinova@satbayev.university; Мотовилов Игорь Юрьевич — ассоциированный профессор, PhD по специальности «Металлургия», i.motovilov@satbayev.university; Омар Рахымжан Султанбекулы — инженер; Адильжан Жанаргул — инженер.

© Барменшинова М. Б., Мотовилов И. Ю., Омар Р. С., Адильжан Ж., 2024

трещинам. Самородное золото встречено в пустотке в брекчиевидной, интенсивно выщелоченной породе, представленной лимонитом и гидроксидами железа. Зерно удлиненной формы размером 0,035×0,01 мм соломенно-желтого цвета с высоким отражением.

Фазовым анализом установлено, что золота свободного и в открытых сростках (цианируемого) содержится 46,47 % мас., остальное находится в сульфидах (37,61 % мас.) и тонковкрапленно в пустую породу (15,92 % мас.). Его содержание в руде составило 1,57 г/т.

Результаты GRG-теста показали, что упорная золотосодержащая руда месторождения Актобе эффективно обогащается на центробежных концентраторах. Протестированы две схемы гравитационного обогащения в цикле измельчения с использованием отсадки и центробежной концентрации. Установлено, что золото в основном имеет крупность менее 0,1 мм, для его извлечения рекомендуется использовать комбинированную схему измельчение–центробежная концентрация.

Методика проведения экспериментов

Флотационные методы

Целью исследований по флотационному обогащению являлось определение оптимального режима флотации для получения сульфидного золотосодержащего концентрата. Изучаемые параметры — крупность измельчения, реагентный режим, время флотации, тип флотационной машины. В выбранном на поисковой стадии оптимальном режиме выполнялись замкнутые тесты по флотации для установления показателей обогащения руды.

Тесты по отработке режима флотации проводились в механической флотомашине с объемом камеры 3 л при скорости вращения импеллера 1300 мин⁻¹ и естественном значении pH 7,8 в открытом цикле по схеме, включающей основную и контрольную операции [16, 17]. После отработки режима флотации проведены сравнительные эксперименты в пневмомеханической флотационной машине.

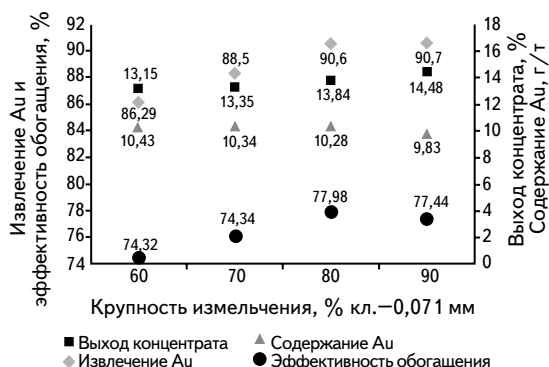


Рис. 1. График зависимости показателей обогащения руды месторождения Актобе от крупности измельчения исходного сырья

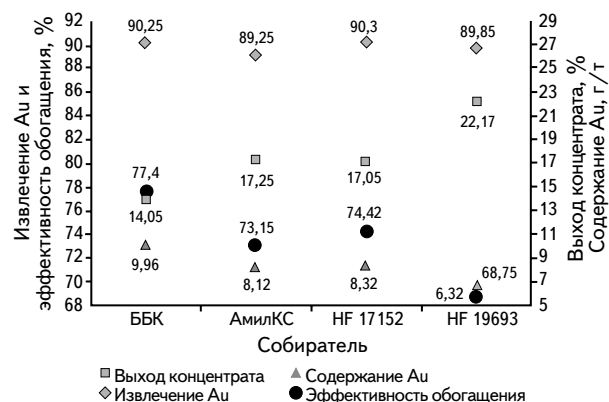


Рис. 2. График зависимости показателей обогащения руды месторождения Актобе от собирателя, использованного во флотации

Определение оптимальной крупности измельчения исходной руды

С целью определения оптимального измельчения исходной руды для флотационного обогащения была проведена серия опытов на материале крупностью 60, 70, 80, и 90 % класса –0,071 мм. Для оценки результатов флотации рассчитаны значения критерия Хэнкока [18] и построен график зависимости выхода, содержания, извлечения золота и эффективности обогащения от крупности измельчения исходной руды (рис. 1).

Сравнение эффективности базовых и новых собирателей

В качестве базовых собирателей сульфидов и золота при флотации использовали бутиловый (ББК) и амилловый (АмилКС) ксантогенаты калия как наиболее распространенные и эффективно работающие реагенты.

В качестве новых проверялись современные собиратели фирмы Clariant (Швейцария) — HOSTAFLOAT 17152 (HF 17152), HOSTAFLOAT 19693 (HF 19693), представляющие собой произво-

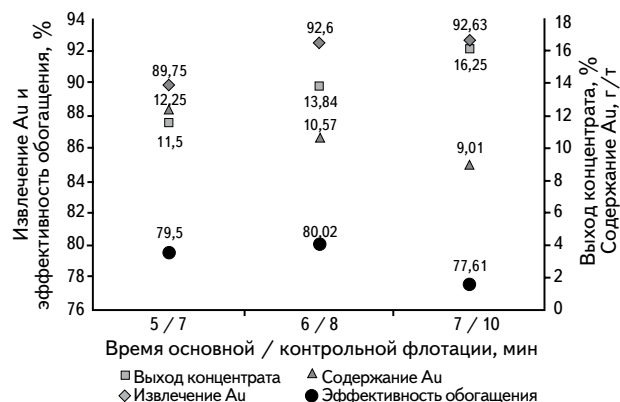


Рис. 3. График зависимости показателей обогащения руды месторождения Актобе в пневмомеханической флотомашине от времени основной и контрольной флотации

дные алкил-жирной кислоты. На рис. 2. приведен график зависимости выхода, содержания, извлечения золота и эффективности обогащения от вида собирателя, использованного во флотации.

Тесты в пневмомеханической флотомашине

По режиму, разработанному на предварительном этапе исследования для механической флотомашин, проведены тесты в пневмомеханической флотомашине с разной продолжительностью основной и контрольной флотации при скорости вращения импеллера 1100 мин⁻¹ и расходе воздуха 4 л/мин (рис. 3).

Замкнутые опыты по флотации при естественном рН пульпы

Для установления показателей обогащения руды по флотационной схеме проведены замкнутые опыты с возвратом оборотных продуктов (8 замкнутых циклов) по режиму, разработанному на предварительном этапе исследования. Протестированы две схемы с одной и двумя перечистными операциями.

Исходная руда измельчалась до крупности 80 % класса менее 0,071 мм и направлялась на флотацию, которая включала: по схеме 1 — основную, контрольную и одну перечистную операции; по схеме 2 — основную, контрольную и две перечистные операции.

Результаты замкнутых флотационных опытов представлены на рис. 4.

Результаты и их обсуждения

Определение оптимальной крупности измельчения исходной руды

В ходе тестов выполнялись операции основной и контрольной флотации. Был принят следующий реагентный режим: расход БКК в основную флотацию — 100 г/т, в контрольную — 50 г/т. В качестве пенообразователя использовался флотанол С-7 при расходе 20 г/т в основную и 10 г/т в контрольную опера-

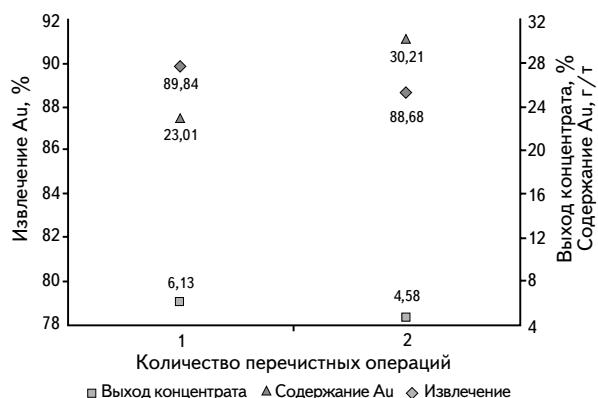


Рис. 4. Зависимости показателей обогащения руды месторождения Актобе от количества перечистных операций в замкнутом опыте

ции. Продолжительность основной флотации составляла 7 мин, контрольной — 10 мин.

По результатам тестов (рис. 1) следует, что наибольший показатель эффективности обогащения получен при крупности измельчения 80 % класса — 0,071 мм. Более тонкое измельчение дает несущественный прирост извлечения золота, который составляет всего 0,10 %, при этом выход черного концентрата увеличивается на 0,64 %. С учетом полученных данных была выбрана оптимальная крупность измельчения, равная 80 % класса — 0,071 мм.

Эффективность базовых и новых собирателей

Основными критериями выбора собирателя были извлечение золота в общий концентрат, его выход, качество и расход собирателя. Наиболее высокие показатели при исследовании различных марок собирателей были получены при одинаковых их расходах в основную (100 г/т) и контрольную (50 г/т) флотацию.

Наибольшее извлечение золота (рис. 2) было достигнуто при использовании БКК и HF 17152 и составило 90,25–90,30 %, однако при применении БКК выход концентрата флотации был ниже и составил 14,05 %, содержание золота в нем выше — 9,96 г/т, также получена более высокая эффективность обогащения — 77,4 %.

На основании результатов тестов с различными собирателями флотацию золотосодержащей руды месторождения Актобе рекомендуется проводить бутиловым ксантогенатом калия при расходах 100 и 50 г/т в основную и контрольную флотацию соответственно.

Флотационные тесты в пневмомеханической флотомашине

В пневмомеханической машине проведена серия тестов при времени основной флотации 5, 6, 7 мин и контрольной 7, 8, 10 мин. Лучшие показатели (рис. 3) получены при времени основной флотации 6 мин, контрольной 8 мин, выход концентрата составил 13,84 % при содержании в нем золота 10,57 г/т и извлечении 92,60 %, эффективность обогащения — 80,02 %.

При флотации исходной руды в пневмомеханической флотомашине извлечение золота в концентрат выше на 2,35 %, общее время основной и контрольной флотации снижается на 3 мин по сравнению с флотацией в механической флотомашине. При выполнении замкнутых тестов операции основной и контрольной флотации выполняли в пневмомеханической флотомашине.

Замкнутые опыты при естественном значении рН пульпы

Для флотации в замкнутом цикле использован оптимальный режим, установленный в открытых опытах: крупность измельчения — 80 % класса — 0,071 мм; расход БКК в основную флотацию — 100 г/т, в кон-

трольную — 50 г/т; расход вспенивателя С-7 в основную флотацию — 20 г/т, в контрольную — 10 г/т; продолжительность основной операции в пневмомеханической флотомашине — 6 мин, контрольной — 8 мин; перечистные операции выполнены в механической флотомашине, протестированы две схемы — с одной и двумя перечистными операциями; время первой перечистой операции — 4 мин, второй — 3 мин.

Из анализа полученных показателей замкнутых тестов флотации с одной и двумя перечистными операциями (рис. 4) следует, что при одной перечистке извлечение золота в концентрат выше на 1,14 % и составило 89,84 %. Содержание золота в концентрате, полученном по схеме с одной перечисткой, составило 23,01 г/т, что позволяет использовать его для дальнейшей переработки гидрометаллургическими методами.

Заключение

В результате выполненного комплекса исследований по флотационному обогащению упорной золотосодержащей руды месторождения Актобе подобрана оптимальная крупность измельчения, изучена флотируемость с разными собирателями и типами флотационных машин, определена продолжительность операций флотации, проведены замкнутые тесты с одной и двумя перечистными флотациями по полной схеме флотационного обогащения. Установлена целесообразность флотации для получения золотосодержащего концентрата и рекомендована технологическая схема с одной перечистой операцией. При обогащении руды с содержанием золота 1,57 г/т получены следующие технологические показатели. Выход флотационного концентрата составил 6,13 % с содержанием золота 23,01 г/т при извлечении металла 89,84 %. Выход хвостов с содержанием золота 0,17 г/т при извлечении Au 10,16 % равнялся 93,87 %.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение гравитационно-флотационной схемы обогащения упорной золотосодержащей руды месторождения Актобе в сравнении с результатами, полученными по флотационной схемой, и отработку условий дальнейшего гидрометаллургического передела концентратов обогащения. Полученные данные на стадии научно-исследовательских работ послужат исходными показателями для составления технологического регламента переработки золотосодержащей руды месторождения Актобе.

Исследования финансируются Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19680182).

Список литературы

1. Комогорцев Б. В., Вареничев А. А. Проблемы переработки бедных и упорных золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 2. С. 204–218.

2. Бодуэн А. Я., Поперечникова О. Ю., Залесов М. В., Григорьева В. А. Экспериментальное опробование технологий переработки упорного золотосодержащего сырья // Цветные металлы. 2022. № 7. С. 24–32.

3. Лодейщиков В. В. Золотоизвлекающие фабрики мира: аналитический обзор. Иркутск: Иргиредмет, 2005. 447 с.

4. Царьков В. А. Опыт работы золотоизвлекающих предприятий мира. М.: Руда и Металлы, 2004. 112 с.

5. Абдыкирова Г. Ж., Кенжалиев Б. К., Койжанова А. К., Магомедов Д. Р. Исследование обогатимости малосульфидной золотокварцевой руды // Обогащение руд. 2020. № 3. С. 14–18.

6. Алгебраистова Н. К., Самородский Г. Н., Колотушкин Д. М., Прокопьев И. В. Технология извлечения золота из золотосодержащего техногенного сырья // Обогащение руд. 2018. № 1. С. 33–37.

7. O'Connor C. T., Dunne R. C. The flotation of gold bearing ores — A review // Minerals Engineering. 1994. Vol. 7, Iss. 7. P. 839–849.

8. Evdokimov S. I., Golikov N. S., Zadkov D. A., Voitovich E. V., Kondratiev V. V., Petrovskiy A. A., Konyukhov V. Y., Gladikh V. A. Studying the flotation of gold-bearing ores using carrier minerals // Minerals. 2024. Vol. 14. DOI: 10.3390/min14010088.

9. Bulatovic S. M. Flotation behaviour of gold during processing of porphyry copper-gold ores and refractory gold-bearing sulphides // Minerals Engineering. 1997. Vol. 10. P. 895–908.

10. Huang Z.-J., Sun W., Gao Z.-Y. Effects of grinding on mineral surface properties and flotation behaviors // Chinese Journal of Nonferrous Metals. 2019. No. 29. P. 2671–2680.

11. Acarkan N. The effect of collector's type on gold and silver flotation in a complex ore // Separation Science and Technology. 2010. Vol. 46. P. 283–289.

12. Bas A. D., Larachi F. The effect of flotation collectors on the electrochemical dissolution of gold during cyanidation // Minerals Engineering. 2019. Vol. 130. P. 48–56.

13. Barmenshinova M. B., Motovilov I. Yu., Telkov Sh. A., Omar R. S. Study of the material composition of refractory gold-bearing ore from the Aktobe deposit // Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources. 2024. No. 4. P. 5–11.

14. Barmenshinova M. B., Motovilov I. Yu., Omar R. S., Fedorov E. V. Study of gravity pretreatment of refractory gold-bearing ore from Aktobe deposit // Eurasian Mining. 2024. No. 1. P. 11–14.

15. Wang X., Qin W., Jiao F., Yang C., Cui Y., Li W., Zhang Z., Song H. Mineralogy and pretreatment of a refractory gold deposit in Zambia // Minerals. 2019. Vol. 9. DOI: 10.3390/min9070406.

16. Han S., Jung M., Lee W. et al. Diagnosis and optimization of gold ore flotation circuit via linear circuit analysis and mass balance simulation // Minerals. 2021. Vol. 11, Iss. 10. DOI: 10.3390/min11101065.

17. Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурднов А. Е. Анализ технологических исследований золотосодержащих руд месторождения Чукотки // Обогащение руд. 2018. № 2. С. 23–29.

18. Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурднов А. Е., Власова В. В. Технология переработки малосульфидной золотокварцевой руды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 6. С. 178–189. 

Development of flotation technology for processing refractory gold-bearing ores from the Aktobe deposit**Information about authors****Barmenshinova M. B.**¹, Head of Chair, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, m.barmenshinova@satbayev.university;**Motovilov I. Yu.**¹, Associate Professor, PhD in Metallurgy, i.motovilov@satbayev.university;**Omar R. S.**¹, Engineer;**Adilzhan Zh.**¹, Engineer.¹ Satbayev University (Almaty, Kazakhstan).**Abstract**

The quest for cost-effective methods to process gold-bearing ores is inextricably linked to a series of preliminary studies, including ore composition analysis, evaluation of the occurrence forms of valuable components, and assessment of the impact of impurity elements and ore physical characteristics on gold recovery. Flotation remains a cornerstone technology in the gold mining industry, essential for the beneficiation of gold-bearing ores. Central to this process is the selection of flotation reagents, which enable effective separation of gold from gangue and associated minerals. This study focuses on the flotation of previously unexamined low-sulfide gold-bearing ore from the Aktobe deposit in the Republic of Kazakhstan. Mineralogical and X-ray phase analyses identified quartz, potassium feldspar, calcite, mica, limonite, and sulfides as the principal minerals in the ore. Phase analysis further revealed that 46.47 % of the gold occurs as free cyanidable gold in open intergrowths, while 37.61 % is locked within sulfides, and 15.92 % is finely disseminated in waste rock. To optimize the flotation process, the influence of critical parameters such as grinding size, reagent dosages, flotation time, and flotation machine type on gold recovery was systematically investigated. Closed-circuit tests with one and two cleaner flotation stages were performed using the optimized reagent regime. The results have demonstrated that a single cleaner flotation stage achieved a 1.14 % higher gold recovery, reaching 89.84 %. The concentrate obtained after the cleaner flotation contained 23.01 g/t of gold, making it suitable for subsequent hydrometallurgical processing.

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant No. AP19680182).

Key words: gold, flotation, phase analysis, collectors, flotation machines, concentrate, recovery.

References

1. Komogortsev B. V., Varenichev A. A. The problems of processing poor and insistent gold-bearing ores. *Gornyi Informatsionno-analiticheskiy Byulleten'*. 2016. No. 2. pp. 204–218.
2. Boduen A. Ya., Poperechnikova O. Yu., Zalesov M. V., Grigoryeva V. A. Experimental testing of technologies for processing refractory gold-bearing raw materials. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 7. pp. 24–32.
3. Lodeishchikov V. V. Gold mining factories of the world: An analytical review. Irkutsk: Irgridmet, 2005. 447 p.
4. Tsarkov V. A. Experience of gold extraction enterprises

of the world. Moscow: Ruda i Metally, 2004. 112 p.

5. Abdykirova G. Zh., Kenzhaliev B. K., Koyzhanova A. K., Magomedov D. R. Low-sulfide gold-quartz ore concentration potential study. *Obogashchenie Rud*. 2020. No. 3. pp. 14–18.

6. Algebraistova N. K., Samorodskiy P. N., Kolotushkin D. M., Prokopyev I. V. Technology of gold recovery from gold-bearing technogenic raw materials. *Obogashchenie Rud*. 2018. No. 1. pp. 33–37.

7. O'Connor C. T., Dunne R. C. The flotation of gold bearing ores — A review. *Minerals Engineering*. 1994. Vol. 7, Iss. 7. pp. 839–849.

8. Evdokimov S. I., Golikov N. S., Zadkov D. A., Voitovich E. V., Kondratiev V. V., Petrovskiy A. A., Konyukhov V. Y., Gladkikh V. A. Studying the flotation of gold-bearing ores using carrier minerals. *Minerals*. 2024. Vol. 14. DOI: 10.3390/min14010088.

9. Bulatovic S. M. Flotation behaviour of gold during processing of porphyry copper-gold ores and refractory gold-bearing sulphides. *Minerals Engineering*. 1997. Vol. 10. pp. 895–908.

10. Huang Z.-J., Sun W., Gao Z.-Y. Effects of grinding on mineral surface properties and flotation behaviors. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*. 2019. No. 29. pp. 2671–2680.

11. Acarkan N. The effect of collector's type on gold and silver flotation in a complex ore. *Separation Science and Technology*. 2010. Vol. 46. pp. 283–289.

12. Bas A. D., Larachi F. The effect of flotation collectors on the electrochemical dissolution of gold during cyanidation. *Minerals Engineering*. 2019. Vol. 130. pp. 48–56.

13. Barmenshinova M. B., Motovilov I. Yu., Telkov Sh. A., Omar R. S. Study of the material composition of refractory gold-bearing ore from the Aktobe deposit. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources*. 2024. No. 4. pp. 5–11.

14. Barmenshinova M. B., Motovilov I. Yu., Omar R. S., Fedorov E. V. Study of gravity pretreatment of refractory gold-bearing ore from Aktobe deposit. *Eurasian Mining*. 2024. No. 1. pp. 11–14.

15. Wang X., Qin W., Jiao F., Yang C., Cui Y., Li W., Zhang Z., Song H. Mineralogy and pretreatment of a refractory gold deposit in Zambia. *Minerals*. 2019. Vol. 9. DOI: 10.3390/min9070406.

16. Han S., Jung M., Lee W. et al. Diagnosis and optimization of gold ore flotation circuit via linear circuit analysis and mass balance simulation. *Minerals*. 2021. Vol. 11, Iss. 10. DOI: 10.3390/min11101065.

17. Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E. Analysis of industrial studies of gold ores of a Chukotka deposit. *Obogashchenie Rud*. 2018. No. 2. pp. 23–29.

18. Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E., Vlasova V. V. Technology for processing low-sulfide gold-quartz ore. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta. Inzhiniring Georesurov*. 2022. Vol. 333, No. 6. pp. 178–189.