ISSN 0202-3776

# ОБОГАЩЕНИЕ РУД

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ. ИЗДАЕТСЯ С 1956 ГОДА



ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ХИМИЧЕСКОГО ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗО-ТИТАНОВЫХ РУД: РАСЧЕТ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ КОНСТАНТ

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ УПОРНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА АЦИДОФИЛЬНЫЕ МИКРООРГАНИЗМЫ ДЛЯ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

РЕГЕНЕРАЦИЯ И РЕЦИКЛИНГ ИЗВЕСТКОВОГО КОМПОНЕНТА ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ КАОЛИНОВОГО СЫРЬЯ

СЕРГЕЙ ЕФИМОВИЧ АНДРЕЕВ: У ИСТОКОВ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ

4[412]▶2024

www.rudmet.ru

ISSN 0202-3776

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

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

# ОБОГАЩЕНИЕ РУД

4[412]▸2024

## СОДЕРЖАНИЕ


### ОБОГАТИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ

**Аверьянова В. Э.** Перспективы биовыщелачивания медно-никелевых руд ацидофильными хемолитотрофными микроорганизмами из термальных источников Камчатки.....3

**Аскарова Г. Е., Мамырбаева К. К., Шаутенов М. Р., Мамбеталиева А. Р.** Интенсификация гравитационного обогащения упорных золотосодержащих руд.....10

**Митрофанова Г. В., Опалев А. С.** Повышение качества тонкоизмельченных магнетитовых концентратов комбинированием сульфидной и силикатной флотации.....17

**Очеретяна С. О., Иодис В. А.** Влияние параметров ультразвуковой обработки на ацидофильные микроорганизмы для бактериально-химического выщелачивания.....23

### ПЕРЕРАБОТКА ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

**Бричкин В. Н., Куртенков Р. В., Максимова Р. И., Бормотов И. С.** Регенерация и рециклинг известкового компонента при комплексной переработке каолинового сырья.....32

**Султонов Б. Э., Холматов Д. С., Расулов А. А., Темиров У. Ш.** Утилизация фосфатных отходов, образующихся при термическом обогащении фосфоритов Центральных Кызылкумов.....39

### МЕТОДЫ АНАЛИЗА В ПРОЦЕССАХ ОБОГАЩЕНИЯ

**Понарядов А. В., Котова О. Б., Силаев В. И., Устюгов В. А.** Термодинамический анализ процессов химического обогащения железо-титановых руд: расчет термохимических констант.....44

### ИСТОРИЧЕСКИЕ ХРОНИКИ

**Лейберов А. И.** Сергей Ефимович Андреев: у истоков обогатительной промышленности России.....51

### Реклама

НПК «Механобр-техника».....2 (обл.)

АО «Союзцветметавтоматика им. Топчаева В. П.».....3 (обл.)

«Майнекс России». 20-й форум и выставка «Горная отрасль будущего: Люди. Технологии. Недра».....4 (обл.)

ТК ИД «Руда и Металлы».....28

**Коровников А. Н., Прудников А. М., Трофимов В. А., Чумаков В. И.** Опыт промышленного применения вибрационных грохотов НПК «Механобр-техника» на ООО «Уральский щебень».....29

Требования к оформлению статей.....50


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

ISSN 0202-3776
9 770202 377002 >

ISSN 0202-3776

# OBOGASHCHENIE RUD
## Mineral Processing Journal

Founded in 1956. Issued every two months

# CONTENTS


## BENEFICIATION PROCESSES

**Averyanova V. E.** Prospects of bioleaching of copper-nickel ores by acidophilic chemolithotrophic microorganisms from thermal springs of Kamchatka.....3

**Askarova G. E., Mamyrbaeva K. K., Shautenov M. R., Mambetalieva A. R.** Intensification of gravity concentration of refractory gold-bearing ores.....10

**Mitrofanova G. V., Opalev A. S.** Improving the grades of fine-grained magnetite concentrates by combining sulfide and silicate flotation.....17

**Ocheretyana S. O., Iodis V. A.** Effect of ultrasonic treatment parameters on acidophilic microorganisms for bacterial-chemical leaching.....23

## SECONDARY RAW MATERIAL PROCESSING

**Brichkin V. N., Kurtenkov R. V., Maksimova R. I. Bormotov I. S.** Regeneration and recycling of lime component in complex processing of kaolin raw materials.....32

**Sultonov B. E., Kholmatov D. S., Rasulov A. A., Temirov U. Sh.** Treatment of phosphate waste generated during thermal processing of phosphorites of the Central Kyzylkum.....39

## ANALYTICAL METHODS IN BENEFICIATION PROCESSES

**Ponaryadov A. V., Kotova O. B., Silaev V. I., Ustyugov V. A.** Thermodynamic analysis of chemical processing of iron-titanium ores: calculation of thermochemical constants.....44

## HISTORICAL CHRONICLES

**Leiberov A. I.** Sergei Efimovich Andreev: at the origins of the beneficiation industry in Russia.....51



**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.,
**Газалеева Г. И.**, д-р техн. наук,
**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 — фотография фабрики окомкования концентрата Стойленского ГОКа (sgok.nlmk.com).*


Дата выхода в свет 18.09.2024. Формат издания 60×90 1/8. Печать офсетная. Печ. л. 7,0. Тираж 800 экз.

Отпечатано в типографии «Канцлер», 150044, г. Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16, стр. 66 А.
Тел. +7 (4852) 58-76-33..

УДК 622.77 : 622.342.1

# ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ УПОРНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД

Г. Е. АСКАРОВА, К. К. МАМЫРБАЕВА, М. Р. ШАУТЕНОВ, А. Р. МАМБЕТАЛИЕВА
(Satbayev University, г. Алматы, Республика Казахстан)*

Представлены исследования, проведенные с целью интенсификации процесса гравитационного обогащения упорных золотосодержащих руд Васильковского месторождения. Для полноты извлечения мелких частиц тяжелого самородного золота и золотосодержащих минералов была усовершенствована конструкция центробежного гидроконцентратора и разработана многостадийная схема обогащения в замкнутом цикле, позволяющая получить извлечение золота из васильковской руды 56,7 %. По новой технологии золото крупностью до −0,074 мм извлекается практически полностью, в среднем на 15–20 % увеличивается извлечение тонкого пылевидного пластинчатого и чешуйчатого золота. Полученные концентраты по содержанию ценных компонентов отвечают требованиям, предъявляемым на золотоизвлекательных заводах.

**Ключевые слова:** золото, золотосодержащий концентрат, Васильковское месторождение, гравитационный метод обогащения, хвосты, центробежный гидроконцентратор, многостадийная схема обогащения.

**DOI:** 10.17580/or.2024.04.02

*Введение*

В настоящее время бедные упорные золотосодержащие руды представляют собой крупный сырьевой источник золота. Для их переработки требуется тонкое измельчение, чтобы получить необходимый уровень извлечения ценного минерала или металла [1]. Наличие мелких частиц затрудняет процесс обогащения в обычных гравитационных сепараторах. Поэтому из-за отсутствия эффективной и экологически безопасной технологии эти руды перерабатываются в ограниченном количестве, проблема их обогащения до настоящего времени остается одной из сложных в производстве благородных металлов [2, 3].

Наличие мышьяка (арсенопирита) и тонкодисперсного золота, значительная часть которого находится в связанном как с сульфидами (главным образом арсенопиритом), так и с породообразующими минералами виде ведет к усложнению технологии производства из упорных руд товарной продукции и ухудшению ее качества. Связь золота с сульфидами вызывает трудности его извлечения, особенно при цианировании, его связь с породообразующими минералами — трудности при флотации и гравитационном обогащении [4].

Поверхность частиц самородного золота в ряде случаев покрыта оксидными пленками, некоторые из них представлены плотными раковинами значительной толщины, что также делает руды упорными и затрудняет процесс извлечения металла [5].

В упорных рудах вкрапленность золота обычно достигает 1,0 мкм [6], из-за мелких частиц золота они перерабатываются по более сложным и разветвленным схемам, таким как гидрометаллургическая и комбинированная (флотация—выщелачивание), позволяющим извлекать металл на уровне 60–75 % [7, 8], в то время как при переработке легкообогащаемых самородных золотосодержащих руд этот показатель достигает 90 % [9].

*Анализ последних исследований и публикаций*

В последние десятилетия для повышения извлечения золота из упорных золотых руд использовались различные методы обогащения [10, 11]. Предложены варианты комбинированных технологий [12–14]. К одним из самых распространенных, эффективных и экологически безопасных относится гравитационное обогащение [15, 16]. Его развитие в последние 20 лет связано с разработкой и внедрением различных аппаратов, в том числе центробежных концентраторов разных конструкций. Эти устройства, по сравнению с другими гравитационными аппаратами, имеют ряд важных преимуществ, таких как высокие показатели извлечения мелких минеральных частиц золота, возможность получения высококачественного концентрата [17].

При извлечении тонкого золота из золотосодержащих упорных руд возникает проблема его получения из сростков как с пустой породой, так и с сульфидами (преимущественно железа и мышьяка). Промпродукты гравитационного обогащения характеризуются довольно высоким содержанием золота, для из-

* Аскарова Гульжан Ермековна — докторант, g.askarova@satbayev.university; Мамырбаева Кульзира Калдыбековна — ассоциированный профессор, PhD по техн. наукам, k.mamyrbayeva@satbayev.university; Шаутенов Мэлс Рахимович — профессор, канд. техн. наук, доцент, m.shautenov@satbayev.university; Мамбеталиева Алима Рахматуллаевна — старший преподаватель, PhD по техн. наукам.

© Аскарова Г. Е., Мамырбаева К. К., Шаутенов М. Р., Мамбеталиева А. Р., 2024

влечения которого используют тонкое измельчение и последующую центробежную сепарацию, чтобы получать концентраты с товарным содержанием благородного металла.

На показатели гравитационного обогащения влияют многие факторы, такие как тип руды, форма нахождения минералов золота [18], методы измельчения, изменение геометрических форм минеральных частиц при измельчении [19–21] и др.

В настоящее время в мировой практике ведутся исследования с целью разработки менее токсичных технологий переработки упорных золотосодержащих руд.

*Постановка задачи*

Многие из приведенных выше методов не являются универсальными, зачастую они сложны либо не позволяют получать из упорных руд товарный золотосодержащий концентрат. Главным недостатком всех описанных ранее технологий является нерешенность проблемы повышения уровня обогащения гравитационным способом.

Гравитационное обогащение упорных золотосодержащих руд с использованием стандартных гидроконцентраторов характеризуется низкой эффективностью, так как большая часть мелкого и тонкого золота (до 70 %) уходит в хвосты. Это связано с тем, что чаши гидроконцентраторов обеспечивают только движение исходного материала в смеси с разрыхляющей водой по образующему конусу и разделение за счет действующих сил на наклонной плоскости. Поскольку площадь пола заполнена ложем (такую поверхность можно считать почти плоской), то движение смеси близко к ламинарному, из-за чего разделение потока недостаточно. При этом максимальные потери золота наблюдаются в самых мелких и самых больших классах крупности.

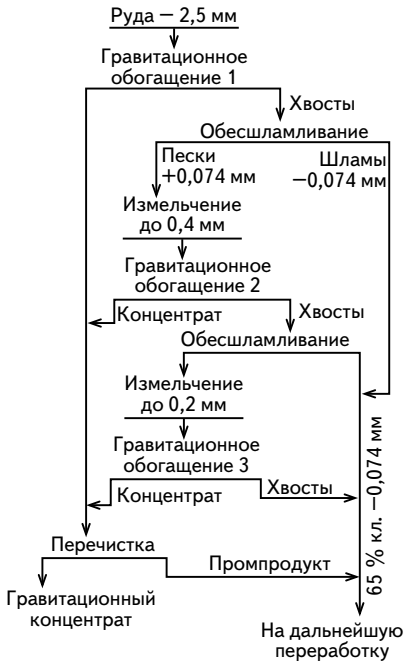



**Рис. 1. Схема гравитационного обогащения упорных золотосодержащих руд Васильковского месторождения**

В этой связи необходима разработка новых или улучшение имеющихся технологий гравитационного обогащения золотосодержащих руд и материалов.

Целью настоящей работы являлось создание экологически безопасной схемы гравитационного обогащения упорной золотосодержащей руды с использованием гидроконцентратора улучшенной конструкции, позволяющего извлекать мелкие и микрочастицы золота.

В качестве исходного сырья для проведения исследований были использованы пробы золотосодержащей упорной руды Васильковского месторождения и отвальных лежалых и текущих хвостов ряда казахстанских ЗИФ.

*Методика проведения экспериментов*

Для определения качественного и количественного состава исходных руд и полученных продуктов были проведены рентгенофлуоресцентный (XRF) (на спектрометре Axios 1 kW компании PANalytical), рентгеновский дифракционный (XRD), спектрометрические (на дифрактометре X'PERT PRO MRD Extended компании PANalytical) анализы. Для изучения поверхности и уточнения форм минералов проведен сканирующий электронный микроскопический (СЭМ) анализ с использованием прибора марки Quanta 200i 3D. Гранулометрический состав руд определяли ситовым и седиментационным методами анализа. При седиментационном анализе в качестве жидкой фазы использована вода.

Пробы руд предварительно были подготовлены дроблением в открытом и замкнутом циклах с контрольным грохочением.

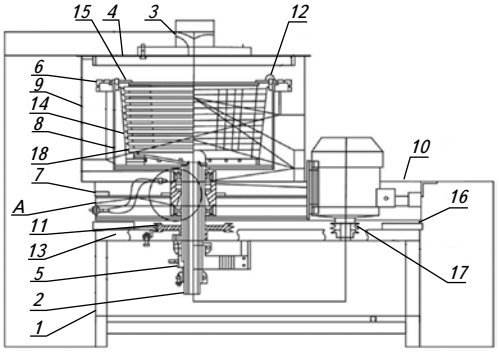



**Рис. 2. Центробежный гидроконцентратор улучшенной конструкции:**
*1* – цилиндрическая часть рабочей поверхности чаши, *2*, *3* – коническая и цилиндрическая поверхности чаши соответственно, *4* – рифли, *5* – отверстия рифлей, *6* – рама, *7* – чаша, *8* – крышка ротора, *9* – кожух сепаратора, *10* – верхняя крышка кожуха сепаратора, *11* – труба, *12* – подшипниковый узел, *13* – клиноременная передача, *14* – сальниковый узел, *15* – шланг, *16* – регулировочные вентили, *17* – приводной электродвигатель, *18* – шкив, *A* – сменная чаша гидроконцентратора

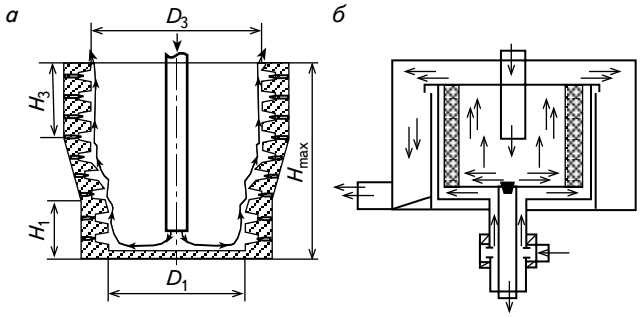



**Рис. 3. Вертикальный разрез чаши гидроконцентратора (*а*) и направление потоков в ней (*б*)**

Гравитационное обогащение упорных золотосодержащих руд Васильковского месторождения проводилось по схеме, показанной на рис. 1. При испытаниях был применен гидравлический концентратор улучшенной конструкции (рис. 2, 3).

Для оценки эффективности разрабатываемой технологии обогащения проводились сравнительные эксперименты на пробах васильковских руд, лежалых и текущих хвостов Акбакайской и Аксуйской золотоизвлекательных фабрик, в которых были использованы центробежный гидроконцентратор улучшенной конструкции и концентратор Knelson марки KC-CVD6.

*Результаты и их обсуждение*

Схемы и режимы переработки руд существенно зависят от их минерального состава, размера и геометрических форм частиц золота, срастания их с минералами, степени сульфидности или окисленности основных минералов, раскрытия ценных компонентов при разупрочнении границ срастания рудных и нерудных составляющих. В связи с этим для разработки экологически чистой и оптимальной технологии извлечения золота предварительно определены точный химический и минеральный составы руды (табл. 1, 2).

Как показал химический анализ, основным компонентом руды является кремнезем с массовой долей 56 %, содержание золота в ней — 3,5 г/т, наблюдаются значительное содержание железа (массовая доля 6,99 %), отсутствие свободной серы и низкое ее содержание в сульфидной форме (массовая доля 1,5 %). Это указывает на то, что руда является умеренно сульфидной.

Как видно из табл. 2, руда на 95 % состоит из породообразующих минералов. Рудные минералы в основном представлены арсенопиритом (его массовая доля составляет 2,8–3,2 %). В единичных зернах в виде редких тонких вкраплений встречаются пирит, халькопирит, оксиды и гидроксиды железа. Суммарная доля минералов железа составляет 4 % от общей массы руды.

Изучение морфологии золотосодержащей руды с использованием сканирующего электроннного микроскопа (СЭМ) до обогащения подтвердило, что золото содержится как в виде крупной, так и мелкой фракции. Основными золотосодержащими минералами являются пирит, арсенопирит и кварц (рис. 4, 5). Значительное количество золота находится в виде мелких частиц (в пределах 2–50 мкм) и характеризуется как пылевидное, тонкодисперсное. Наиболее крупные его зерна имеют размер 0,1–0,2 мм (рис. 5, *а*) и присутствуют в руде в незначительном количестве (порядка 1 % от общей массы металла).

Седиментационным анализом установлено, что крупность свободных частиц золота находится в пределах 0,01–0,074 мм, большая их часть имеет размер менее 0,074 мм, что свидетельствует о принадлежности основной массы исследованной руды к очень мелкодисперсной. Из такого продукта золото плохо извлекается при обогащении отсадкой и на концентрационным столе.

Процессы подготовки руды, используемые для вскрытия всех минеральных форм золота, включают операции дробления, грохочения, классификации и измельчения. Для золотосодержащих минералов в схемах подготовительных процессов необходимо учитывать физико-механические свойства его минеральных форм.

Таблица 1

**Химический состав руды Васильковского месторождения**

| Элемент, соединение | Массовая доля, % |
|---|---|
| $SiO_2$ | 56,00 |
| $Al_2O_3$ | 20,01 |
| MgO | 1,02 |
| CaO | 1,01 |
| $Fe_{общ}$ | 6,99 |
| $S_{общ}$ | — |
| $S_{сульфид.}$ | 1,50 |
| Pb | 0,49 |
| Cu | 0,60 |
| Zn | 1,14 |
| As | 0,15 |
| Au | 3,50 г/т |
| Ag | 16,50 г/т |

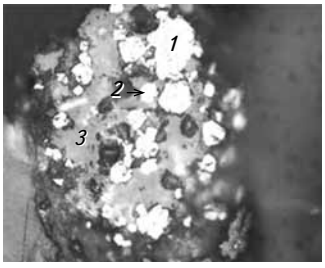



**Рис. 4. Микрофотография образца руды Васильковского месторождения:**
*1* — пирит, *2* — арсенопирит, *3* — кварц

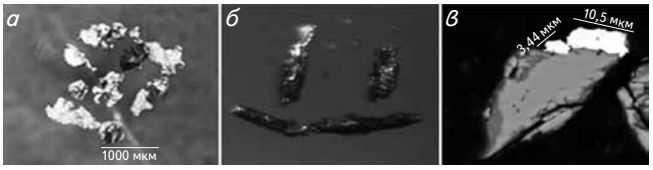



**Рис. 5. Микроструктура частиц золота, соответствующих различным фазам:**
*а* — крупные (1 мм и более) частицы свободного золота с чистой поверхностью, *б* — частицы золота в пленках (ржавое золото), *в* — золото в сростках с арсенопиритом

Таблица 2

**Минеральный состав проб васильковской руды**

| Минералы | Химическая формула | Массовая доля, % |
|---|---|---|
| Кварц | $SiO_2$ | 40 |
| Микроклин | $K[AlSi_3O_8]$ | 24 |
| Плагиоклазы | $NaAlSi_3O_8 - CaAl_2Si_2O_8$ | 20 |
| Биотит | $K\,(Mg, Fe)_3[Si_3AlO_{10}][OH, F]_2$ | 5,0 |
| Хлорит, гидрослюда | $(Mg,Fe)_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2{\cdot}(Mg,Fe)_3(OH)_6$, $(K, H_2O)\,Al_2[(Al, Si)\,Si_3O_{10}](OH)_2{\cdot}nH_2O$ | 5,0 |
| Гидроксиды железа: гетит, лимонит | $FeO(OH)$, $FeOOH{\cdot}(Fe_2O_3{\cdot}nH_2O)$ | 2,0 |
| Оксиды железа: гематит, магнетит | $Fe_2O_3$, $FeO{\cdot}Fe_2O_3$ | 2,0 |
| Арсенопирит | FeAsS | 2,8–3,2 |
| Пирит | $FeS_2$ | Единичные значения |
| Халькопирит | $CuFeS_2$ | То же |
| Акцессорные: | | |
| апатит | $Ca_5(PO_4)_3(F,OH,Cl)$ | —"— |
| циркон | $ZrSiO_4$ | —"— |
| циртолит | $Zr[SiO_4]$ | —"— |
| флюорит | $CaF_2$ | —"— |
| Свободное золото | Au | —"— |
| Итого | | 100,0 |

Для руд с золотом больших размеров обычно достаточно измельчения до крупности 50 % класса –0,074 мм. Однако чем мельче его частицы, тем тоньше помол. Поскольку в большинстве руд содержится крупное и тонкое золото, чаще всего они измельчаются до крупности 75–80 % класса –0,074 мм. В некоторых случаях необходим еще более тонкий помол — до крупности –0,043 мм.

Для изучения раскрытия зерен золота в зависимости от крупности сырья дробление проб руды Васильковского месторождения проводилось в две стадии в открытом и замкнутом цикле. Результаты ее гранулометрического анализа приведены в табл. 3.

Результаты изучения гранулометрического состава дробленой золотосодержащей руды крупностью от 40 до 2,5 мм и от 2,5 до 0,074 мм с определением содержания золота и его распределения по классам крупности приведены в табл. 4.

Таблица 3

**Результаты гранулометрического анализа васильковской руды при последовательном снижении верхнего предела крупности с 40 до 5 мм**

| Классы крупности, мм | Выход при дроблении руды до крупности (мм), % | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 40 | | 10 | | 5 | |
| | Частный | Суммарный | Частный | Суммарный | Частный | Суммарный |
| Более 40 мм | 1,15 | 1,15 | — | — | — | — |
| –40+20 | 29,05 | 30,20 | 2,43 | 2,43 | — | — |
| –20+10 | 44,26 | 74,46 | 41,14 | 43,57 | 2,28 | 2,28 |
| –10+5 | 10,02 | 84,48 | 26,70 | 70,27 | 44,26 | 46,54 |
| –5+2,5 | 8,17 | 92,65 | 16,49 | 86,76 | 31,78 | 78,32 |
| –2,5+0 | 7,35 | 100 | 13,24 | 100 | 21,68 | 100 |
| Руда | 100 | — | 100 | — | 100 | — |

Как показывают данные табл. 4, при дроблении материала размером от 40 до 2,5 мм наблюдается значительный выход крупных классов, что характерно для руд с повышенной твердостью. Выход класса –1,25+0,8 мм составляет 30,02 %, а относительно крупного класса –0,56+0,40 мм — 8,0 %, распределение золота — 37,11 и 10,50 % соответственно. Суммарный выход просеянного и мытого классов –0,074 мм составляет 22,88 %. Однако распределение золота в мытом образце больше в 3,2 раза по сравнению с просеянным.

При дроблении руды крупностью от 2,5 до 0,074 мм наблюдается высокий выход класса –0,074 мм мытого, затем — класса –1,25+0,8 мм, распределение золота в них составляет 17,13 и 28,41 % соответственно.

В обоих случаях несколько обогащенными оказались классы +1,25 мм с содержанием золота в них 10,8 и 2,6 г/т. Наблюдается рост вскрываемости золота с увеличением дисперсности руды.

С учетом недостатков стандартного гидроконцентратора для повышения и оптимизации показателей обогащения рабочая поверхность гидроконцентрато-

Таблица 4

**Результаты гранулометрического анализа с распределением золота по классам крупности дробленой руды**

| Классы крупности, мм | Выход в | | Содержание Au, г/т | Распределение Au, % |
|---|---|---|---|---|
| | г | % | | |
| Крупность от 40 до 2,5 мм | | | | |
| +1,25 | 78,3 | 4,04 | 10,8 | 7,49 |
| –1,25+0,8 | 600 | 30,02 | 7,2 | 37,11 |
| –0,8+0,56 | 230 | 11,86 | 5,6 | 11,41 |
| –0,56+0,40 | 166,8 | 8,0 | 7,6 | 10,50 |
| –0,40+0,30 | 112,7 | 5,81 | 5,6 | 5,570 |
| –0,30+0,20 | 126,8 | 6,54 | 5,2 | 5,88 |
| –0,20+0,15 | 51,8 | 2,99 | 6,2 | 3,18 |
| –0,15+0,1 | 84,0 | 4,38 | 4 | 2,99 |
| –0,1+0,074 | 56,1 | 2,89 | 5,4 | 2,68 |
| –0,074 сеяный | 73,4 | 3,78 | 4,8 | 3,14 |
| –0,074 мытый | 353 | 18,9 | 3,1 | 10,15 |
| Всего | 1932 | 100 | 5,8 | 100 |
| Крупность от 2,5 до 0,074 мм | | | | |
| +1,25 | 136,4 | 6,82 | 2,6 | 8,78 |
| –1,25+0,80 | 409,8 | 20,49 | 2,8 | 28,41 |
| –0,80+0,56 | 204,0 | 10,20 | 2,4 | 12,12 |
| –0,56+0,40 | 183,2 | 9,16 | 2,5 | 11,34 |
| –0,40–0,30 | 92,0 | 4,61 | 1,8 | 4,22 |
| –0,30+0,15 | 79,5 | 3,97 | 2,0 | 3,93 |
| –0,15+0,10 | 89,5 | 4,47 | 1,7 | 3,76 |
| –0,10+0,074 | 52,6 | 2,63 | 2,2 | 2,86 |
| –0,074 сеяный | 177,0 | 8,85 | 1,7 | 7,45 |
| –0,074 мытый | 576,0 | 28,8 | 1,2 | 17,13 |
| Всего | 2000 | 100,00 | 2,02 | 100,00 |

Таблица 5

**Результаты обогащения хвостов концентрационного стола в центробежном гидроконцентраторе и концентраторе Knelson**

| Продукты | Выход, % | Содержание Au, г/т | Извлечение Au, % |
|---|---|---|---|
| Центробежный гидроконцентратор | | | |
| Концентрат | 0,80 | 28,35 | 56,70 |
| Хвосты | 99,20 | 1,75 | 43,30 |
| Итого | 100,00 | 4,00 | 100,00 |
| Концентратор Knelson | | | |
| Концентрат | 0,45 | 14,20 | 15,97 |
| Хвосты | 99,55 | 2,50 | 84,03 |
| Итого | 100,0 | 4,00 | 100,00 |

ра усовершенствованной конструкции (рис. 2) сборная и состоит из последовательно чередующихся снизу вверх цилиндрической, конической и снова цилиндрической поверхностей. Внутренняя сторона выполнена в виде рифленой стенки с отверстиями, равномерно расположенными по окружности каждой канавки. Центробежное обогащение сопровождается внутренней подачей турбулизирующей воды в чашу аппарата. Подача такой воды в пристеночный слой внутри чаши приводит к его размыву и перемешиванию с целью высвобождения и удаления частиц породы. В данном гидроконцентраторе за счет высокой напряженности центробежного поля и противодействия потока воды ожижения значительно повышается производительность — улавливаются частицы золота размером в несколько микрон, что в конечном счете приводит к повышению эффективности всего процесса обогащения.

Соотношение диаметров верхнего и нижнего цилиндров рабочей поверхности аппарата составляет 1,2–1,5, их высоты — 1,1–1,15, диаметра верхнего цилиндра и высоты чаши стакана — 1,4–1,5, угол раскрытия конуса равен 13–20°, количество отверстий размером 1,5 мм на 1 м$^2$ — 2000–2500, удельный расход воды — 1,0–1,5 м$^3$/т сухого материала, центробежное ускорение в верхнем цилиндре — 70–95, производительность — 40 кг/ч.

Для оценки эффективности в гидроконцентраторе усовершенствованной конструкции и, для сравнения, в концентраторе Knelson проводилось обогащение хвостов концентрационного стола после тонкого измельчения руды с 0,4 до 0,2 мм, результаты приведены в табл. 5.

Результаты показывают, что извлечение золота в концентрат высокое и достигает 56,7 %, его содержание — 28,35 %. Хвосты, содержание золота в которых низкое, в дальнейшем подаются на флотационное обогащение.

Микроскопический анализ проб хвостов показал отсутствие в них мелких и тонких пылевидных зерен самородного золота (рис. 6, *а*). Остаточное его количество присутствует в связанном виде с минералами арсенопиритом, кварцем (рис. 6, *б*, *в*).

Для подтверждения эффективности разработанной технологии были проведены сравнительные опыты по обогащению проб различных казахстанских золотосодержащих руд, а также лежалых и текущих хвостов золотоизвлекательных фабрик с использованием гидроконцентратора и концентратора Knelson. Полученные результаты приведены в табл. 6.

Таблица 6

**Результаты сравнительных опытов по гравитационному обогащению золотосодержащих руд и хвостов различных месторождений**

| Образцы | Продукты | Выход в | | Содержание золота, г/т | Извлечение золота, % |
|---|---|---|---|---|---|
| | | г | % | | |
| Обогащение в гидроконцентраторе | | | | | |
| Руды Акбакайского месторождения | Концентрат | 0,71 | 0,40 | 23,91 | 72,21 |
| | Хвосты | 174,29 | 99,60 | 3,70 | 27,80 |
| | Руда | 175,00 | 100 | 13,20 | 100,0 |
| Лежалые хвосты Акбакайской ЗИФ (2,1 г/т Au) | Концентрат | 0,84 | 2,10 | 20,60 | 20,61 |
| | Хвосты | 39,16 | 97,90 | 1,70 | 79,42 |
| | Руда | 40,00 | 100,00 | 2,10 | 100,00 |
| Текущие хвосты Аксуской ЗИФ | Концентрат | 0,97 | 2,59 | 16,3 | 5,23 |
| | Хвосты | 36,43 | 97,41 | 0,81 | 94,77 |
| | Руда | 37,4 | 100,00 | 1,19 | 100,00 |
| Обогащение в аппарате Knelson | | | | | |
| Руды Акбакайского месторождения | Концентрат | 0,95 | 0,92 | 10,01 | 69,69 |
| | Хвосты | 102,01 | 99,08 | 4,04 | 30,31 |
| | Руда | 102,96 | 100,00 | 1,32 | 100,00 |
| Лежалые хвосты Акбакайской ЗИФ (2,1 г/т Au) | Концентрат | 0,73 | 0,91 | 18,22 | 18,28 |
| | Хвосты | 81,36 | 99,09 | 1,73 | 81,72 |
| | Руда | 82,09 | 100,00 | 2,10 | 100,00 |
| Текущие хвосты Аксуской ЗИФ | Концентрат | 0,13 | 0,05 | 14,2 | 1,54 |
| | Хвосты | 249,87 | 99,95 | 0,65 | 98,46 |
| | Руда | 250,00 | 100,00 | 0,66 | 100,00 |

Данные табл. 6 показывают, что извлечение золота происходит более эффективно на гидроконцентраторе: при обогащении акбакайской руды содержание золота в концентрате повышается почти в 2,5 раза по сравнению с результатами в аппарате Knelson; при обогащении лежалых хвостов Акбакайской ЗИФ оно увеличивается в 1,13 раза, текущих хвостов Аксуской ЗИФ — в 1,15 раза. Низкое извлечение золота из хвостов можно объяснить тем, что их крупность весьма невелика и находится в пределах 0,00–0,040 мм, поэтому металл плохо извлекается даже центробежным гидроконцентратором, отсюда их дальнейшая переработка выщелачиванием (цианидным, тиосульфатным и др.).

Таким образом, проведенные исследования подтверждают, что за счет использования гидроконцентратора улучшенной конструкции при обогащении упорных золотосодержащих руд с мелкими частицами золота обеспечивается интенсификация процесса, что позволяет рекомендовать этот аппарат для переработки аналогичного сырья. Полученные данные согласуются с выводами в [22].

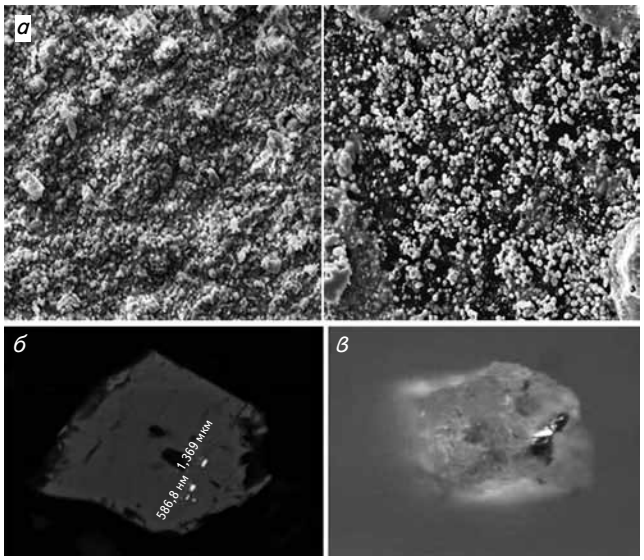



**Рис. 6. Микроструктура хвостов обогащения в центробежном гидроконцентраторе (*а*) и остаточное золото в них — внутри частицы пирита (*б*) и в кварцевой рубашке (*в*).** Увеличение 2000×

*Заключение*

Руда Васильковского месторождения содержит более 20 % свободного золота. Основным рудным минералом является арсенопирит с массовой долей в руде 2,8–3,2 %. Экспериментально установлено, что для полного извлечения мелкого пылевидного золота необходимо провести тонкое стадиальное дробление и последующее трехстадийное обогащение с использованием гравитационного концентратора улучшенной конструкции.

Проведение процесса гравитационного обогащения в три стадии по рекомендуемой схеме обеспечивает повышение содержания золота в концентрате почти в 2,5 раза за счет вскрытия и улавливания частиц металла размером в несколько микрон. Содержание золота в произведенном из руды Васильковского месторождения концентрате составляет 28,35 г/т, извлечение — 56,7 %.

Полученные концентраты по содержанию ценных компонентов отвечают требованиям, предъявляемым на золотоизвлекательных заводах. Хвосты обогащения поступают на флотацию.

*Список литературы*

1. Бочаров В. А., Абрютин Д. В. Технология золотосодержащих руд. М.: МИСиС, 2011. 419 с.

2. Dominy S. C., O'Connor L., Glass H. J., Xie Y. Geometallurgical study of a gravity recoverable gold orebody // Minerals. 2018. Vol. 8, Iss. 5. DOI: 10.3390/min8050186.

3. Koppalkar S., Bouajila A., Gagnon C., Noel G. Understanding the discrepancy between prediction and plant GRG recovery for improving the gold gravity performance // Minerals Engineering. 2011. Vol. 24, Iss. 6. P. 559–564.

4. Ofori-Sarpong G., Amankwah R. K. Comminution environment and gold particle morphology: Effects on gravity concentration // Minerals Engineering. 2011. Vol. 24, Iss. 6. P. 590–592.

5. Das A., Sarkar B. Advanced gravity concentration of fine particles: A review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2018. Vol. 39, Iss. 6. P. 359–394.

6. Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E. Hydrometallurgical processing of gold-containing ore and its beneficiation products // Metallurgist. 2021. Vol. 65. P. 214–227.

7. Chen Q., Yang H., Tong L., Niu H., Zhang F., Chen G. Research and application of a Knelson concentrator: A review // Minerals Engineering. 2020. Vol. 152. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106339.

8. Никитенко Е. М., Михалицына Т. И., Фомина М. И., Соцкая О. Т. Золоторудное месторождение Среднеканская дайка (северо-восток России) // Обогащение руд. 2021. № 6. С. 16–22.

9. Федотов П. К., Сенченко А. Е., Федотов К. В., Бурдонов А. Е. Исследования обогатимости упорных первичных и смешанных руд золоторудного месторождения Красноярского края // Обогащение руд. 2017. № 3. С. 21–26.

10. Завьялов С. С., Мамонов Р. С. Комбинированная технология сухого предварительного обогащения золотосодержащей руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 11–1. С. 338–345.

11. Рассулов В. А., Нерущенко Е. В. Лазерно-фотометрическая кусковая сепарация золотосодержащей руды // Обогащение руд. 2020. № 5. С. 16–22.

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

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

14. Poperechnikova O. U., Kuptsova A. V., Nagaeva S. P. On possible extraction of free gold within grain size –0.8+0 mm by flash flotation of low-sulphide gold-containing ores // Proc. of 29th International mineral processing congress. 2019. P. 1599–1609.

15. Nayak A., Jena M. S., Mandre N. R. Application of enhanced gravity separators for fine particle processing: An overview // Journal of Sustainable Metallurgy. 2021. Vol. 7. P. 315–339.

16. Пелих В. В., Салов В. М., Бурдонов А. Е., Лукьянов Н. Д. Применение Knelson CVD-технологии для обогащения золотосвинцовой руды // Обогащение руд. 2019. № 1. С. 3–11.

17. Суримбаев Б. Н., Каналы Е. С., Болотова Л. С., Шалгымбаев С. Т. Оценка гравитационной обогатимости золотосодержащей руды — GRG // Горные науки и технологии. 2020. Т. 5, № 2. С. 92–103.

18. Rabieh A., Albijanic B., Eksteen J. J. Influence of grinding media and water quality on flotation performance of gold bearing pyrite // Minerals Engineering. 2017. Vol. 112. P. 68–76.

19. Moosakazemi F., Tavakoli Mohammadi M. R., Mohseni M., Karamoozian M., Zakeri M. Effect of design and operational parameters on particle morphology in ball mills // International Journal of Mineral Processing. 2017. Vol. 165. P. 41–49.

20. Nie Y., Chen J., Wang Q., Zhang C., Shi C., Zhao J. Use of dry grinding process to increase the leaching of gold from a roasted concentrate containing hematite in the thiosulfate system // Hydrometallurgy. 2021. Vol. 201. DOI: 10.1016/j.hydromet.2021.105582.

21. Fullam M., Watson B., Laplante A., Gray S. Gold ore processing. Elsevier, 2016. 991 p.

22. Ni L., Tian J., Song T., Jong Y., Zhao J. Optimizing geometric parameters in hydrocyclones for enhanced separations: A review and perspective // Separation & Purification Reviews. 2019. Vol. 48, Iss. 1. P. 30–51. DP

OBOGASHCHENIE RUD, 2024, No. 4, pp. 10–16
DOI: 10.17580/or.2024.04.02

**Intensification of gravity beneficiation of refractory gold-bearing ores**

**Information about authors**
**Askarova G. E.**[1], Doctoral Student, g.askarova@satbayev.university;
**Mamyrbayeva K. K.**[1], Associate Professor, PhD in Engineering Sciences, k.mamyrbayeva@satbayev.university;
**Shautenov M. R.**[1], Professor, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, m.shautenov@satbayev.university;
**Mambetalieva A. R.**[1], Senior Lecturer.

[1] Satbayev University (Almaty, Republic of Kazakhstan).

**Abstract**
As high-grade gold-bearing ore reserves rapidly become depleted, there is a growing shift towards processing lower-grade refractory ores. These ores contain gold that is finely dispersed, making it more challenging to extract. Gravity beneficiation is a common initial processing method used for these ores. However, due to the extremely small size of the gold particles, significant amounts of gold are lost during this process. This study explores methods to improve gravity beneficiation of refractory gold-bearing ores from the Vasilkovskoye deposit. Physicochemical and particle size distribution analyses have shown that gold particles in the ore samples are very small, ranging from 0.01 mm to 0.074 mm in size. Most of these particles are either dust-like or flaky and are smaller than 0.074 mm. In order to optimize the recovery of fine particles of heavy native gold and gold-bearing minerals, the design of the centrifugal hydroconcentrator was refined and a closed-cycle multi-stage concentration process was developed, which improved the recovery of gold from the Vasilkovskoye deposit ore to 56.7 %. Comparative concentration experiments for various gold-bearing ores, including tailings and waste from several processing plants, have demonstrated that the newly developed gravity beneficiation technology can improve gold concentration efficiency by a factor of 2.38. This advanced technology enables the almost complete recovery of gold particles up to 0.074 mm in size and improves the recovery of very fine, dust-like, plate-like, and flaky gold particles by approximately 15–20 %. The resulting concentrate grades meet the current requirements of gold plants.

**Key words:** gold, gold-bearing concentrate, Vasilkovskoye deposit, gravity beneficiation, tailings, centrifugal hydroconcentrator, multi-stage beneficiation process.

**References**

1. Bocharov V. A., Abryutin D. V. Technology of gold-bearing ores. Moscow: MISIS, 2011. 419 p.

2. Dominy S. C., O'Connor L., Glass H. J., Xie Y. Geometallurgical study of a gravity recoverable gold orebody. *Minerals*. 2018. Vol. 8, Iss. 5. DOI: 10.3390/min8050186.

3. Koppalkar S., Bouajila A., Gagnon C., Noel G. Understanding the discrepancy between prediction and plant GRG recovery for improving the gold gravity performance. *Minerals Engineering*. 2011. Vol. 24, Iss. 6. pp. 559–564.

4. Ofori-Sarpong G., Amankwah R. K. Comminution environment and gold particle morphology: Effects on gravity concentration. *Minerals Engineering*. 2011. Vol. 24, Iss. 6. pp. 590–592.

5. Das A., Sarkar B. Advanced gravity concentration of fine particles: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2018. Vol. 39, Iss. 6. pp. 359–394.

6. Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E. Hydrometallurgical processing of gold-containing ore and its beneficiation products. *Metallurgist*. 2021. Vol. 65. pp. 214–227.

7. Chen Q., Yang H., Tong L., Niu H., Zhang F., Chen G. Research and application of a Knelson concentrator: A review. *Minerals Engineering*. 2020. Vol. 152. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106339.

8. Nikitenko E. M., Mikhalitsyna T. I., Fomina M. I., Sotskaya O. T. Srednekanskaya dike gold deposit in the northeast of Russia. *Obogashchenie Rud*. 2021. No. 6. pp. 16–22.

9. Fedotov P. K., Senchenko A. E., Fedotov K. V., Burdonov A. E. The Krasnoyarsk Territory primary and complex gold rebellious ores dressability studies. *Obogashchenie Rud*. 2017. No. 3. pp. 21–26.

10. Zavyalov S. S., Mamonov R. S. Mixed-type dry pretreatment technology for gold-bearing ore. *Gornyi Informatsionno-analiticheskiy Byulleten'*. 2021. No. 11–1. pp. 338–345.

11. Rassulov V. A., Nerushchenko E. V. Laser-photometric lump separation of gold-bearing ore. *Obogashchenie Rud*. 2020. No. 5. pp. 16–22.

12. 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.

13. 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.

14. Poperechnikova O. U., Kuptsova A. V., Nagaeva S. P. On possible extraction of free gold within grain size –0.8+0 mm by flash flotation of low-sulphide gold-containing ores. *Proc. of 29th International mineral processing congress*. 2019. pp. 1599–1609.

15. Nayak A., Jena M. S., Mandre N. R. Application of enhanced gravity separators for fine particle processing: An overview. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2021. Vol. 7. pp. 315–339.

16. Pelikh V. V., Salov V. M., Burdonov A. E., Lukyanov N. D. Application of Knelson CVD technology for beneficiation of gold-lead ore. *Obogashchenie Rud*. 2019. No. 1. pp. 3–11.

17. Surimbayev B. N., Kanaly E. S., Bolotova L. S., Shalgymbayev S. T. Assessment of gravity dressability of gold ore — GRG test. *Gornye Nauki i Tekhnologii*. 2020. Vol. 5, No. 2. pp. 92–103.

18. Rabieh A., Albijanic B., Eksteen J. J. Influence of grinding media and water quality on flotation performance of gold bearing pyrite. *Minerals Engineering*. 2017. Vol. 112. pp. 68–76.

19. Moosakazemi F., Tavakoli Mohammadi M. R., Mohseni M., Karamoozian M., Zakeri M. Effect of design and operational parameters on particle morphology in ball mills. *International Journal of Mineral Processing*. 2017. Vol. 165. pp. 41–49.

20. Nie Y., Chen J., Wang Q., Zhang C., Shi C., Zhao J. Use of dry grinding process to increase the leaching of gold from a roasted concentrate containing hematite in the thiosulfate system. *Hydrometallurgy*. 2021. Vol. 201. DOI: 10.1016/j.hydromet.2021.105582.

21. Fullam M., Watson B., Laplante A., Gray S. Gold ore processing. Elsevier, 2016. 991 p.

22. Ni L., Tian J., Song T., Jong Y., Zhao J. Optimizing geometric parameters in hydrocyclones for enhanced separations: A review and perspective. *Separation & Purification Reviews*. 2019. Vol. 48, Iss. 1. pp. 30–51.