

Доизвлечение золота в циклах измельчения и классификации медно-цинковой руды колчеданного месторождения в безнапорном центробежном поле

Чинова Н. Б.¹

¹ АО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия

e-mail: npodoksenova@yandex.ru

Реферат

Целью работы является развитие технологии гравитационного доизвлечения попутного тонкодисперсного золота и повышение эффективности переработки упорных сплошных медных и медно-цинковых руд.

Методология проведения исследований заключалась в анализе и обобщении научно-технической информации, изучении вещественного состава циркуляционных промпродуктов обогащения медно-цинковой руды и проведении экспериментов гравитационными и флотационными методами обогащения.

Результаты и их анализ. В схеме обогащения медно-цинковой руды одного из колчеданных месторождений Урала установлены наличие гравитационного золота и эффект его циркуляции в цикле доизмельчения концентрата основной медной флотации. Определяющим фактором получения качественного гравитационного концентрата при сепарации циркулирующего продукта цикла доизмельчения медного концентрата основной медной флотации в центробежном концентраторе является максимальное время накопления тяжелой фракции в его концентрационном конусе при центробежном ускорении, равном 90 g, и расходе флюидизационной воды 3,5 л/мин. Для достижения максимального извлечения золота в товарную продукцию процесс переработки медно-цинковой руды необходимо вести по комбинированной флотационно-гравитационно-флотационной технологии, предусматривающей в цикле доизмельчения медного концентрата основной медной флотации центробежную концентрацию с получением тяжелой фракции и ее последующей доводкой на концентрационном столе.

Ключевые слова: медно-цинковая руда; вещественный состав; циркуляционный промпродукт; золото; центробежная концентрация; гравитационный концентрат; экономическая оценка.

Введение. Текущее положение в области потребления драгоценных металлов определяет потребность в повышении производства золота, серебра, платины и других ценных компонентов, что вызывает необходимость поиска, изучения и внедрения альтернативных методов доизвлечения драгметаллов из комплексных руд колчеданных месторождений, в которых золото и серебро являются попутными компонентами [1].

Золото в рудах гидротермальных месторождений присутствует в двух основных формах: собственная минеральная («видимое» золото) и рассеянная в сульфидах (тонкодисперсное, «невидимое» золото). Понятие «невидимое» подразумевает внеструктурное ультрамикроскопическое (менее 0,1 мкм) и структурносвязанное изоморфное состояние золота. Форма внеструктурного золота представляет собой в основном его металлическое состояние (самородное золото, интерметаллиды) и в подчиненном виде – теллуридное соединение [2].

На основе результатов исследований, выполненных многими авторами (Абрамов А. А., Бочаров В. А., Зеленов В. И., Каковский И. А., Кисляков Л. Д., Кулигин С. А., Лачко О. А., Масленицкий И. Н., Морозов Ю. П., Некрасов Б. Д., Ортин М. Ф., Плаксин И. Н., Чантурия В. А., Чантурия Е. Л. и др.), можно отметить следующее: в сплошных сульфидных рудах Учалинского, Узельгинского, Гайского и других месторождений содержание самородного свободного золота при измельчении руды до 98 % класса $-0,074$ мм составляет 4–15 % от всей массы золота; тесно ассоциированного золота с пиритом – до 80 %, из которого большая часть, представленная частицами крупностью менее 30 мкм, «законсервирована» в дисульфиде железа и при дальнейшем измельчении не раскрывается [3].

По данным практики переработки колчеданных медных и медно-цинковых руд, содержащих от 30 до 90 % сульфидной серы, извлечение золота в медный концентрат по классической флотационной схеме обогащения составляет 10–35 %; в цинковый концентрат – 2–4 %; потери золота с отвальными хвостами – более 60 %. Исследования и практика обогащения руд с высокой степенью сульфидности показывают, что извлечение золота находится в прямой зависимости от содержания в ней основных рудных минералов – пирита и сульфидов меди [3]. В начальный период освоения Гайского месторождения из руд, содержащих до 20 % пиритной серы, извлечение золота в медный концентрат составляло 60–65 % [3]. В настоящее время из руд глубоких горизонтов Гайского месторождения с содержанием сульфидной серы 30–31 % извлечение золота в медный концентрат снизилось до 8–11 %. Актуальные технологические показатели извлечения золота в медные концентраты из сплошных руд Учалинского и Узельгинского месторождений, содержащих до 90 % пирита, не превышают 6–9 и 12–15 %, соответственно. При обогащении смешанных сульфидных и вкрапленных руд (месторождения Урупское, Октябрьское и др.), в которых содержание серы составляет 15–30 %, извлечение золота находится на уровне 20–35 %.

В работах [4–9] освещены гравитационные и флотационные методы доизвлечения попутных форм золота из сульфидных медно-цинковых руд разных регионов России, приведены результаты исследований обогатимости минерального сырья и рекомендуемые схемы обогащения.

Одно из направлений интенсификации гравитационного извлечения золота при обогащении медных и медно-цинковых руд – применение короткоконусных гидроциклонов и концентрационных столов для извлечения свободного золота в цикле измельчения. В условиях Гайской обогатительной фабрики предложена и апробирована технология гравитационного выделения золота из цикла рудного измельчения, включающая два короткоконусных гидроциклона и концентрационные столы [8].

Практика компоновки гравитационно-флотационных методов обогащения в схеме переработки сульфидных вкрапленных руд применяется в условиях обогатительной фабрики АО «Урупский ГОК» (*Исследование возможности получения кондиционного гравитационного медного продукта из руды Урупского месторождения без снижения уровня технологических показателей флотационной переработки сырья: отчет о НИР. Екатеринбург: АО «Уралмеханобр», 2023. 60 с.*). Принципиальная схема: слив короткоконусных гидроциклонов, установленных на разгрузке второй стадии измельчения, поступает в следующую стадию классификации, в то время как пески короткоконусных гидроциклонов подаются на концентрационные двухдечные столы. Включение гравитационных аппаратов в классическую флотационную технологию переработки медных руд позволяет доизвлекать 1–2 % золота в концентрат стола за счет улавливания его гравитационных форм в цикле рудоподготовительных операций.

Развитие технологии гравитационного доизвлечения попутного тонкодисперсного золота, ассоциированного с сульфидными минералами, в контуре центробежного поля позволит снизить потери драгметалла с хвостами флотационных обогатительных фабрик и, соответственно, повысить эффективность переработки упорных к золоту сплошных медных и медно-цинковых руд [10–15].

Методология проведения исследований заключалась в анализе и обобщении научно-технической информации; в изучении вещественного состава циркуляционных промпродуктов обогащения медно-цинковой руды посредством современных методов количественного химического (спектрометр эмиссионный с индуктивно связанной плазмой Arcos, атомно-абсорбционный спектрометр SolaariCE 3000) и рентгенофазового анализов (рентгеновский дифрактометр XRD-7000S, спектрометр рентгенофлуоресцентный Perform_X), рентгеноспектрального микроанализа на сканирующем электронном микроскопе (EVO-MA 15); в проведении экспериментов гравитационными и флотационными методами обогащения с использованием современных автоматизированных лабораторных флотационных машин типа ФМП-Л, центробежного концентратора Knelson MD-3, стола концентраторного лабораторного типа СКЛ.

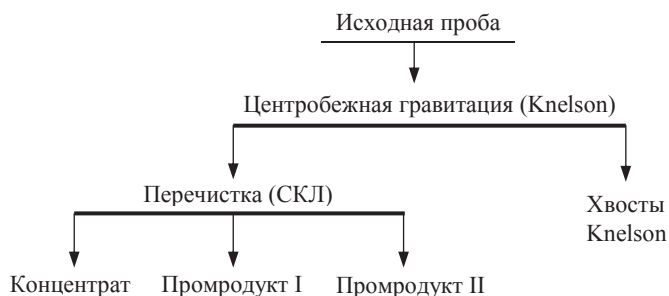


Рисунок 1. Схема проведения опыта
Figure 1. Scheme of the experiment

Результаты и обсуждение. В настоящей работе приведены результаты исследования возможности гравитационного выведения золотосодержащего продукта из циркуляционных промпродуктов обогащения медно-цинковой руды месторождений Урала с использованием центробежной концентрации. Объектами исследований являются промпродукты обогащения медно-цинковой руды, представленные разгрузкой мельницы доизмельчения концентрата основной медной флотации, и пески гидроциклона операции классификации разгрузки мельницы доизмельчения концентрата основной медной флотации. Исследуемые промпродукты обогащения медно-цинковой руды являются трудноцианируемым сырьем: при содержании 97–98 % класса $-0,071$ мм прямым цианированием из них извлекается 8–19 % золота.

Исследования центробежного концентрирования золота из промпродуктов обогащения медно-цинковой руды проведены с использованием матричного планирования (полного факторного эксперимента – ПФЭ) для определения наиболее эффективного режима сепарации каждого типа промпродукта [16]. Опыты по центробежному разделению проб осуществлены в концентраторе Knelson MD-3. Изменяемые параметры работы концентратора: центробежное ускорение ротора концентратора – от 60 до 120 g, расход флюидизационной (ожижающей) воды – от 2,5 до 4,5 л/мин, масса навески – от 1 до 3 кг.

Анализ результатов ПФЭ показал отсутствие какого-либо существенного влияния центробежного ускорения и расхода оживающей воды на технологические показатели обогащения для всех исследуемых объектов. Единственный фактор, оказывающий прямое воздействие на изменение качества тяжелой фракции центробежной сепарации – масса навески, подаваемой в аппарат. Указанный параметр регулирует продолжительность накопления тяжелой фракции в конусе сепаратора. В качестве оптимальных параметров работы концентратора приняты условия опытов «центра плана», а именно: центробежное ускорение – 90 g, расход воды – 3,5 л/мин.

Таблица 1. Результаты гравитационного обогащения проб промпродуктов обогатительной фабрики

Table 1. Results of gravity beneficiation of middling product samples from the processing plant

Продукт	Выход, %	Содержание Au, г/т	Извлечение Au, %
<i>Пески гидроциклона операции классификации разгрузки мельницы доизмельчения концентрата основной медной флотации</i>			
Концентрат СКЛ	0,03	65,00	0,82
Промпродукт I (I п/п)	0,79	18,80	7,65
Тяжелая фракция Knelson	0,82	20,19	8,47
Хвосты Knelson	99,18	1,80	91,53
Исходная навеска	100,00	1,95	100,00
<i>Разгрузка мельницы доизмельчения концентрата основной медной флотации</i>			
Концентрат СКЛ	0,05	88,70	1,96
Промпродукт I (I п/п)	0,72	11,20	3,83
Промпродукт II (II п/п)	0,11	3,00	0,16
Тяжелая фракция Knelson	0,88	14,29	5,95
Хвосты Knelson	99,12	2,00	94,05
Исходная навеска	100,00	2,11	100,00

В режиме оптимальных параметров центробежного ускорения ротора концентратора и расхода флюидизационной воды выполнены эксперименты на укрупненных навесках промпродуктов массой 15 кг. Тяжелые фракции центробежной сепарации подвергли доводочной операции на концентрационном столе. Схема проведения опытов представлена на рис. 1, результаты исследований приведены в табл. 1, по ним можно сделать вывод, что при гравитационном обогащении песков гидроциклона операции классификации разгрузки мельницы доизмельчения концентрата основной медной флотации, содержащих 1,95 г/т золота, возможно получение тяжелой фракции центробежного концентратора с содержанием благородного металла 20,19 г/т при извлечении 8,47 %. Перечистка этой тяжелой фракции на концентрационном столе позволяет увеличить содержание золота в гравитационном концентрате (концентрате СКЛ) до 65 г/т при извлечении 0,82 %.

При гравитационном обогащении разгрузки мельницы доизмельчения концентрата основной медной флотации, содержащей 2,11 г/т золота, можно получить гравитационный концентрат (концентрат СКЛ) с содержанием благородного металла 88,7 г/т при извлечении 1,96 %. Гравитационный концентрат получается в результате доводки на СКЛ тяжелой фракции центробежного концентратора, содержание золота – 17,29 г/т, извлечение – 5,95 %.

Для дальнейших исследований в качестве перспективного циркуляционного продукта схемы переработки медно-цинковых руд принят материал разгрузки мельницы доизмельчения концентрата основной медной флотации.

Для набора статистических данных о наличии гравитационно-извлекаемого золота в разгрузке мельницы доизмельчения концентрата основной медной флотации и подтверждения результатов исследований проведена серия экспериментов на восьми укрупненных пробах, отобранных на действующей обогатительной фабрике в период с февраля 2022 г. по март 2024 г. Исследования проведены на двух стадиях концентрирования: первая стадия – в центробежном концентраторе, вторая стадия – на концентрационном столе (перечистка тяжелой фракции центробежного концентрата).

Таблица 2. Результаты гравитационного обогащения проб разгрузки мельницы доизмельчения концентрата основной медной флотации

Table 2. Results of gravity beneficiation of samples from the unloading mill for regrinding the main copper flotation concentrate

Номер пробы	Содержание золота, г/т		Извлечение золота, %	Степень сокращения
	Исходная проба	Концентрат стола		
1	3,30	215,00	8,62	65,1
2	9,73	402,00	12,71	41,3
3	3,38	54,60	8,41	16,0
4	4,33	116,54	11,70	26,9
5	5,46	166,41	15,73	30,5
6	5,44	87,64	8,72	16,1
7	3,21	64,01	13,11	19,9
8	9,41	242,21	8,28	25,7

Сводные результаты исследований (табл. 2.) показали, что при гравитационном обогащении проб разгрузки мельницы доизмельчения концентрата основной медной флотации, содержащих от 3,38 до 9,73 г/т золота, возможно получение гравитационного концентрата (концентрат СКЛ – концентрат перечистки тяжелой фракции центробежного сепаратора) с содержанием золота от 54 до 400 г/т при извлечении от 8,28 до 15,73 %. Степень концентрирования золота в концентраты гравитационного обогащения составила от 16 до 65. С учетом анализа полученных данных, можно сделать вывод о наличии гравитационного золота, которое преимущественно концентрируется и циркулирует в цикле доизмельчения концентрата основной медной флотации.

Для определения сквозного извлечения золота в гравитационный и флотационный медный концентраты выполнены сравнительные эксперименты по фабричной флотационной технологии (базовый вариант) и по комбинированной флотационно-гравитационно-флотационной технологии (исследуемый вариант).

По результатам исследований получено:

– по базовому варианту – медный концентрат II перечистой медной флотации с массовой долей меди 15,28 %, золота 7,29 г/т при извлечении золота 52,78 %;

– по исследуемому варианту – гравитационный концентрат с содержанием золота 50,21 г/т при извлечении золота 8,78 % и медный концентрат II перечистой медной флотации с массовой долей меди 15,57 %, золота 6,32 г/т при извлечении золота 45,24 %.

Прирост сквозного извлечения золота в концентраты по исследуемому варианту составил 1,24 %.

Выполнена экономическая оценка флотационно-гравитационно-флотационной технологии обогащения медно-цинковой руды с установкой центробежного концентрата на разгрузке мельницы доизмельчения концентрата основной

медной флотации. Реализация данной схемы позволит получить дополнительно 6,9 кг золота в год или 55,6 кг за расчетный период эксплуатации месторождения. Общий прирост стоимости товарной продукции за период составит 387,7 млн руб.

Выводы. В схеме обогащения медно-цинковой руды одного из колчеданных месторождений Урала установлено наличие гравитационного золота, отмечен эффект его циркуляции в цикле доизмельчения концентрата основной медной флотации. Для достижения максимального извлечения золота в товарную продукцию процесс переработки медно-цинковой руды необходимо вести по комбинированной флотационно-гравитационно-флотационной технологии, предусматривающей в цикле доизмельчения медного концентрата основной медной флотации центробежную концентрацию с получением тяжелой фракции и ее последующей доводкой на концентрационном столе. Определяющим фактором получения качественного гравитационного концентрата при сепарации циркулирующего продукта цикла доизмельчения медного концентрата основной медной флотации в центробежном концентраторе является максимальное время накопления тяжелой фракции в его концентрационном конусе при центробежном ускорении, равном 90 g, и расходе флюидизационной воды 3,5 л/мин. Комбинированная флотационно-гравитационно-флотационная технология обогащения медно-цинковой руды позволяет добиться прироста сквозного извлечения золота в товарную продукцию около 1,24 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чинова Н. Б., Синьков И. С., Мамонов С. В. Извлечение драгоценных металлов из циркуляционных потоков в схеме обогащения медно-цинковой руды колчеданного месторождения // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: матер. междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 4–5 апреля 2024 г. С. 275–275.
2. Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Лапшина Г. А., Хачарян Л. С. Особенности извлечения золота из золотосодержащих сульфидных руд // ГИАБ. 2004. № 12. С. 297–301.
3. Викентьев И. В. Невидимое и микроскопическое золото в пирите: методы исследования и новые данные для колчеданных руд Урала // Геология рудных месторождений: 2015. Т. 57. № 4. С. 267–298.
4. Бочаров В. А., Чантурия Е. Л. Технология извлечения золота из классов широкого спектра крупности сульфидного минерального техногенного сырья // Неделя горняка-2002. Семинар № 21.
5. Evdokimov S. I., Gerasimenko T. E. Developing the technology of associated gold recovery when concentrating copper-pyrite ore // News of the higher institutions. Mining journal. 2021. No. 7. P. 35–42. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-7-35-42
6. Способ обогащения золотосодержащих продуктов: пат. 2598668 Рос. Федерация. № 2015126385/03; заявл. 01.07.2015; опубл. 27.09.2016. Бюл. № 27, 7 с.
7. Комбинированный способ извлечения золота при переработке медно-колчеданных руд и отвальных продуктов: пат. 2165793 Рос. Федерация. № 99115210/03; заявл. 08.07.1999. опубл. 27.04.2001. Бюл. № 11, 14 с.
8. Морозов Ю. П. Повышение комплексности использования сульфидных руд на основе дополнительного извлечения золота. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2015. 61 с.
9. Абдыкирова Г. Ж., Танекеева М. Ш., Тойланбай Г. И., Нурахметова Г. Б. Исследование на обогатимость золотосодержащих хвостов по гравитационно-флотационной схеме обогащения // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения–2013): матер. междунар. сов. 16–19 сентября 2013 г. Томск: ТПУ, 2013. С. 415–417.
10. Пеньков П. М., Морозов Ю. П., Хамидулин И. Х. Совершенствование центробежной сепарации на основе пневматической турбулизации пристеночного слоя конуса сепаратора // ГИАБ. 2023. № 12. С. 120–133.
11. Фалей Е. А. Повышение извлечения тонкодисперсного золота в турбулизационных центробежных сепараторах // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: матер. междунар. науч.-техн. конф., 23–24 апреля 2014 г. Екатеринбург. С. 84–89.
12. Nzeh N., Popoola P., Okanigbe D., Adeosun S., Adelek A. Physical beneficiation of heavy minerals – Part 1: A state of the art literature review on gravity concentration techniques // Heliyon. 2023. Vol. 9. Iss. 8.
13. Marion C., Langlois R., Kökklıç O., Zhou M., Williams H., Awais M., Rowson N. A., Waters K. E. A design of experiments investigation into the processing of fine low specific gravity minerals using a laboratory Knelson concentrator // Minerals engineering. 2018. Vol. 135. P. 139–155. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.08.023

14. Klein B., Emre Altun N., Ghaffari H., McLeavy M. A hybrid flotation-gravity circuit for improved metal recovery // Minerals engineering. 2010. Vol. 94. P. 159–165. DOI: 10.1016/j.minpro.2010.02.005

15. Koppalkar S., Bouajila A., Gagnon C., Guillaume N. Understanding the discrepancy between prediction and plant GRG recovery for improving the gold gravity performance // Minerals engineering. 2011. Vol. 24. P. 559–564. DOI: 10.1016/j.mineng.2010.09.007

16. Козин В. З., Пелевин А. Е. Теория инженерного эксперимента. Екатеринбург: УГТУ, 2016. 165 с.

Поступила в редакцию 28 июня 2024 года

Сведения об авторе:

Чинова Надежда Борисовна – старший научный сотрудник отдела обогащения (наука) АО «Уралмеханобр». E-mail: npodoksenova@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0007-9329-1079>

DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-47-54

Additional extraction of gold in grinding cycles and classification of copper-zinc ore of a pyrite deposit in gravity-centrifugal field

Nadezhda B. Chinova¹

¹ AO Uralmexhanobr, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research objective is to develop the technology associated gravity-based additional extraction of finely dispersed gold and increase the efficiency of processing refractory solid copper and copper-zinc ores.

Methods of research include analyzing and summarizing scientific and technical information, studying the material composition of circulating copper-zinc ore middling, and conducting experiments using gravity and flotation beneficiation methods.

Results and their analysis. In the processing flow sheet for copper-zinc ore from one of the Ural pyrite deposits, the presence of gravitational gold is detected, and the effect of its circulation in the regrinding cycle of the main copper flotation concentrate is recorded. The determining factor in obtaining a high-quality gravity concentrate during the separation of the circulating product of the main flotation copper concentrate regrinding cycle in a centrifugal concentrator is the maximum time of heavy fraction accumulation in its concentration cone under a centrifugal acceleration of 90 g and a fluidization water flow rate of 3.5 l/min. To achieve maximum extraction of gold into marketable products, copper-zinc ore must be processed by a combined flotation-gravity-flotation technology, which provides for centrifugal concentration in the cycle of regrinding the copper concentrate of the main copper flotation to obtain a heavy fraction and its subsequent finishing on the concentration table.

Keywords: copper-zinc ore; material composition; circulating middling product; gold; centrifugal concentration; gravity concentrate; economic assessment.

REFERENCES

1. Chinova N. B., Sinkov I. S., Mamonov S. V. Extraction of precious metals from circulation flows in the beneficiation scheme of copper-zinc ore of a sulfide deposit. In: *Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials: materials of the International Scientific and Technical Conference. Ekaterinburg, April 4–5, 2024.* p. 275–275. (In Russ.)

2. Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Lapshina G. A., Khacharian L. S. Features of gold extraction from gold-containing sulfide ores. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal).* 2004; 12: 297–301. (In Russ.)

3. Vikentiev I. V. Invisible and microscopic gold in pyrite: methods and new data for pyrite ores of the Urals. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii = Geology of Ore Deposits.* 2015; 57(4): 267–298. (In Russ.)

4. Bocharov V. A., Chanturiia E. L. Technology of gold extraction from a wide range of sizes of sulfide mineral technogenic raw materials. In: *Miner's Week-2002.* 2002; 21. (In Russ.)

5. Evdokimov S. I., Gerasimenko T. E. Developing the technology of associated gold recovery when concentrating copper-pyrite ore. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 7: 35–42. Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2021-7-35-42
6. Morozov Iu. P., Khamidulin I. Kh., Falei E. A. *Method of dressing gold-containing products*. Patent RF no. 2598668; 2016. (In Russ.)
7. Kirpishchikov S. V., Topachev V. P., Krampit I. A., Pesterev P. S., Gurova L. K., Ulitenko K. Ia., Vershinina A. S. *Integrated method for recovering gold in the processing of copper pyrite ores and rejected products*. Patent RF no. 2165793; 2001. (In Russ.)
8. Morozov Iu. P. *Increasing the integrated use of sulfide ores based on additional gold extraction*. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset Publishing; 2015. (In Russ.)
9. Abdykirova G. Zh., Tanekeeva M. Sh., Toilanbai G. I., Nurakhmetova G. B. Study on the beneficiation of gold-bearing tailings using a gravity-flotation beneficiation scheme. In: *Innovative processes of complex and deep processing of mineral raw materials, Plaksin readings – 2013: Proceedings of the International Meeting, 16–19 September 2013*. Tomsk: TPU Publishing; 2013. (In Russ.)
10. Penkov P. M., Morozov Iu. P., Khamidulin I. Kh. Improvement of centrifugal separation on the basis of pneumatic turbulization of separator cone wall layer. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2023; 12: 120–133. (In Russ.)
11. Falei E. A. Increasing the recovery of fine gold in turbulence centrifugal separators. In: *Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials: Proceedings of International Scientific and Technical Conference, April 23–24, 2014*. Ekaterinburg. p. 84–89 (In Russ.)
12. Nzeh N., Popoola P., Okanigbe D., Adeosun S., Adelek A. Physical beneficiation of heavy minerals – Part 1: A state of the art literature review on gravity concentration techniques. *Heliyon*. 2023; 9(8).
13. Marion C., Langlois R., Kökklüç O., Zhou M., Williams H., Awais M., Rowson N. A., Waters K. E. A design of experiments investigation into the processing of fine low specific gravity minerals using a laboratory Knelson concentrator. *Minerals Engineering*. 2018; 135: 139–155. Available from: doi: 10.1016/j.mineng.2018.08.023
14. Klein B., Emre Altun N., Ghaffari H., McLeavy M. A hybrid flotation-gravity circuit for improved metal recovery. *Minerals Engineering*. 2010; 94: 159–165. Available from: doi: 10.1016/j.minpro.2010.02.005
15. Koppalkar S., Bouajila A., Gagnon C., Guillaume N. Understanding the discrepancy between prediction and plant GRG recovery for improving the gold gravity performance. *Minerals Engineering*. 2011; 24: 559–564. Available from: doi: 10.1016/j.mineng.2010.09.007
16. Kozin V. Z., Pelevin A. E. *The theory of engineering experimentation*. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2016. (In Russ.)

Received 28 June 2024

Information about the author:

Nadezhda B. Chinova – senior researcher, Department of Processing (science), AO Uralmekhanobr. E-mail: npodoksenova@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0007-9329-1079>

Для цитирования: Чинова Н. Б. Доизвлечение золота в циклах измельчения и классификации медно-цинковой руды колчеданного месторождения в безнапорном центробежном поле // Известия вузов. Горный журнал. 2024. № 5. С. 47–54. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-47-54

For citation: Chinova N. B. Additional extraction of gold in grinding cycles and classification of copper-zinc ore of a pyrite deposit in gravity-centrifugal field. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2024; 5: 47–54 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2024-5-47-54