

Научная статья
УДК 622,7
DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-3-74-90

Исследование экологоэкономических методов повышения извлечения золота из упорного минерального сырья

Лидия Владимировна Шумилова¹, Алиса Николаевна Хатькова²,
Константин Константинович Размахнин³, Михаил Фёдорович Простакишин⁴

^{1,2,3,4}Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

¹shumilovalv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>,

²alisa1965.65@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6527-0026>,

³constantin-const@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2944-7642>,

⁴m.prostakishin@gmail.com

Информация о статье

Статья поступила
в редакцию 30.06.2023

Одобрена после
рецензирования 29.08.2023

Принята к публикации
30.08.2023

Ключевые слова:

золотодобывающая
отрасль, динамика добычи
золота, воспроизводство
и использование
природных ресурсов,
горнопромышленные
отходы, кучное
выщелачивание,
экологоэкономические методы
интенсификации
выщелачивания, тонкое
измельчение, активация
цианида натрия, свинцовый
глет, озон

Разработка переносных модульных сборно-разборных комплексов, которые можно размещать на дне отработанных карьеров для переработки забалансовых руд и лежалых хвостов, расположенных в непосредственной близости от мест их хранения, является актуальной научной проблемой. Цель исследования – экспериментальное исследование в лабораторных условиях технологии выщелачивания золота из шихты отходов горных предприятий на основе применения экологоэкономических методов интенсификации процесса выщелачивания. Задачи исследования состояли из двух этапов. I этап – анализ развития золотодобывающей отрасли в современном мире, инвестиции и тренды. II этап – апробация в лабораторных условиях на укрупнённой лабораторной пробе технологии выщелачивания золота из шихты отходов горных предприятий добычи и переработки с применением методов интенсификации, позволяющих снизить расход цианида натрия. Установлено, что в соответствии с государственной программой РФ «Воспроизводство и использование природных ресурсов», по долгосрочным прогнозам, начиная с 2024 г., впервые планируется отработка техногенного сырья, объёмы которого постепенно будут увеличиваться к 2030 г. Цена на золото в мире остаётся на достаточно высоком уровне, с большой долей вероятности можно прогнозировать локальные её повышения вплоть до нового максимума. Экспериментальным путём установлены зависимости: извлечения золота из шихты от содержания класса минус 0,071 мм; концентрации золота в растворе от продолжительности выщелачивания и содержания класса минус 0,071 мм; извлечения золота из окомкованной шихты техногенного сырья от крупности измельчения и методов интенсификации процесса выщелачивания: тонкое измельчение; добавка глета; активация раствора NaCN озоном. Извлечение золота в раствор составило 88,4 %. Расход цианистого натрия при применении экологоэкономических интенсифицирующих методов сократился в 1,3 раза (с 0,4 до 0,31 кг/т).

Благодарность: Работа выполнена в рамках реализации проекта РНФ 22-17-00040 «Научное обоснование и разработка экологически чистых безотходных технологий переработки природного и техногенного минерального сырья» (2022–2023 гг.).

Research of Environmentally Friendly methods of Increasing the Extraction of Gold from Stubborn Mineral Raw Materials

Lidia V. Shumilova¹, Alisa N. Khatkova²,
Konstantin K. Razmakhnin³, Mikhail F. Prostakishin⁴

^{1,2,3,4}Transbaikal State University, Chita, Russia

¹shumilovalv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>,

²alisa1965.65@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6527-0026>,

³constantin-const@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2944-7642>,

⁴m.prostakishin@gmail.com

Information about the article

Received 30 June, 2023

Approved after review
29 August, 2023

Accepted for publication
30 August, 2023

Keywords:

gold mining industry,
dynamics of gold production,
reproduction and use of
natural resources, mining
waste, heap leaching,
environmentally friendly
methods of leaching
intensification, fine grinding,
activation of sodium cyanide,
lead glet, ozone

The development of portable modular collapsible complexes that can be placed at the bottom of spent quarries for processing off-balance ores and stale tailings located in close proximity to their storage sites is an urgent scientific problem. The aim is an experimental study in laboratory conditions of the technology of leaching gold from the charge of waste from mining enterprises based on the use of environmentally friendly methods of intensification of the leaching process. The research tasks consisted of two stages. Stage I – analysis of the development of the gold mining industry in the modern world, investments and trends. Stage II – testing in laboratory conditions on an enlarged laboratory sample of the technology of leaching gold from the charge of waste from mining and processing enterprises using intensification methods that reduce the consumption of sodium cyanide. It is established that in accordance with the state program of the Russian Federation “Reproduction and use of natural resources”, according to long-term forecasts, starting from 2024, it is planned for the first time to develop man-made raw materials, the volumes of which will gradually increase by 2030. The price of gold in the world remains at a fairly high level, with a high degree of probability it can be predicted to increase locally, up to a new maximum. The dependences of: gold extraction from the charge on the content of the class minus 0.071 mm; the concentration of gold in the solution on the duration of leaching and the content of the class minus 0.071 mm; gold extraction from the pelletized charge of technogenic raw materials on the fineness of grinding and methods of intensification of the leaching process: fine grinding; glet additive; activation of the NaCN solution with ozone. The extraction of gold into the solution was 88.4 %. The consumption of sodium cyanide with the use of environmentally friendly intensifying methods has decreased by 1.3 times (from 0.4 to 0.31 kg/t).

Acknowledgement: The work was carried out as part of the implementation of the RSF project 22-17-00040 “Scientific justification and de-velopment of environmentally friendly waste-free technologies for processing natural and technogenic mineral raw materials” (2022–2023).

Введение. В настоящее время во всём мире требуется большое количество золота, являющегося надёжной инвестицией и ключевым показателем устойчивости государства к кредитным рискам. Поэтому активно проводятся исследования в области физико-химической геотехнологии по рециклингу, ранее нерентабельного золотосодержащего сырья, подвергнутого многолетнему криогенезу (упорное минеральное сырьё) [2; 3].

Учитывая количество техногенных отходов, зарегистрированных в Государственном реестре объектов размещения отходов Российской Федерации, такие темпы научных проработок явно недостаточны [10], особенно в области зелёных технологий, относящихся

к наилучшим доступным технологиям – НДТ, Best Available Technologies [1; 9; 12–15; 17].

Парадигма устойчивого развития государств мира [4; 16; 18] и крупная хозяйственная задача для всех стран – это необходимость разработки эффективных технологий переработки минерального сырья природных и техногенных объектов с учётом экологических требований, в том числе реализуемых на переносных модульных комплексах. На таких сборно-разборных модулях, которые можно размещать на дне отработанных карьеров, можно перерабатывать забалансовые руды и лежалые хвосты, расположенные в непосредственной близости от мест их хранения. При этом можно значительно

снизить капитальные и эксплуатационные затраты.

Объект исследования – шихта отходов гипергенной метаморфизации предприятий добычи и переработки золотосодержащих руд. **Предмет исследования** – технология кучного выщелачивания золота из шихты отходов горных предприятий с применением экологощадящих методов интенсификации процесса извлечения золота из упорного минерального сырья.

Цель исследования – экспериментальное исследование в лабораторных условиях технологии выщелачивания золота из шихты отходов горных предприятий на основе применения экологощадящих методов интенсификации процесса выщелачивания.

Задачи исследования состояли из двух этапов: I этап – анализ развития золотодобывающей отрасли в современном мире, инвестиции и тренды; II этап – апробация в лабораторных условиях на укрупнённой лабораторной пробе технологии выщелачивания золота из шихты отходов горных предприятий добычи и переработки с применением методов интенсификации, позволяющим снизить расход цианида натрия.

Материалы и методы исследования. Развитие золотодобывающей отрасли в современном мире, инвестиции и тренды исследовались с использованием общенаучных методов (анализ, в том числе факторный, и синтез).

Анализ осуществлялся на базе данных экспертной оценки и официальных архивных сведений следующих организаций: ФГБУ «Росгеолфонд»; Минфин России; Федеральная пробирная палата; Федеральная таможенная служба России; ФГБУ «ЦНИГРИ»; U. S. Geological Survey; China Gold Association; Surbiton Associates Pty Ltd.; Ministerio de Energía y Minas; London Bullion Market Association (LBMA); Metals Focus Gold; USGS, расчёты ИГТ; Институт геотехнологий; Федеральное казенное учреждение «Государственное учреждение по формированию Государственного фонда драгоценных металлов и драгоценных камней Российской Федерации, хранению, отпуску и использованию драгоценных металлов и драгоценных камней (Гохран России) при Министерстве финансов Российской Федерации»; Институт геотехнологий. Также использовались открытые данные Союза золотопромышленников России и публичной отчётности золотодобывающих компаний.

Состояния сырьевой базы золота в мире и в Российской Федерации анализировалось по нескольким признакам: запасы, производство, использование, динамика биржевых цен на золото, динамика добычи золота из недр, производство и экспорт золота, полученного из минерального сырья и др.

Синтез полученных сведений осуществлялся по следующим признакам: распределение добычи золота между субъектами Российской Федерации, динамика добычи золота из недр по типам месторождений РФ, ТОП-10 золотодобывающих стран мира, ТОП-10 российских регионов по производству золота, тенденции развития золотодобывающей отрасли в современном мире, инвестиции и тренды и др.

При проведении экспериментальных исследований эффективность выщелачивания оценивалась по показателю извлечения золота в раствор или твёрдого остатка на основе результатов элементного и фазового анализа, контроля измерения массы твёрдой фазы.

Удельная активная поверхность выщелачивания минерального сырья определялась по формуле (1) для различных содержаний класса крупности минус 0,071 мм: 75 %, 80 %, 85 %, 90 %, 95 %

$$A = k_c / S_{уд}, \quad (1)$$

где $S_{уд}$ – удельная поверхность исследуемого минерального продукта;

k – среднее значение подэкспоненциального множителя.

Подэкспоненциальный множитель k уравнения кинетики растворения минеральных частиц определялся по формуле

$$-k = 1/[t_i \ln(1 - n_i/n_n)], \quad (2)$$

где t_i – время от начала растворения, с;

n_i – концентрация раствора в момент времени t_i , мг/л;

n_n – концентрация насыщенного раствора (при $t_i \geq t_n$), мг/л.

Порядок измерения концентрации в опытах по растворению минералов определяется конкретной методикой анализа раствора, которая должна удовлетворять следующим требованиям: соотношение Т:Ж в исследуемой суспензии не меняется в ходе опыта (в результате пробоотбора жидкой фазы и т. д.); анализу подвергается только жидкая фаза (золото, перешедшее из твёрдой фазы в раствор).

Этим требованиям наиболее соответствует метод измерения концентрации на

основе потенциометрии с ионоселективным электродом. Этот метод даёт возможность измерять концентрацию растворённого вещества непосредственно в водно-минеральной суспензии, что позволяет исключить операции пробоотбора и разделения фаз. Ионоселективный электрод подбирали в соответствии с ионом золота, входящим в состав изучаемых минералов и наиболее активно переходящим в раствор (собственный ион минерала). Нижний порог чувствительности не должен превышать 10^{-5} моль/л измеряемого иона золота.

Разработанность темы. Учёные Забайкальского государственного университета достаточно активно занимаются комплексными исследованиями по кучному выщелачиванию золота из отходов добычи золотосодержащих руд месторождений Забайкалья и/или их переработки – рис. 1 [5–8]. Предприятий по переработке техногенных отходов в Забайкальском крае нет. Однако следует продолжать исследования в данном научном направлении по разработке альтернативных технологий переработки отходов золотодобывающей отрасли, поскольку в настоящий период изменилось отношение инвесторов к техногенным объектам, в связи с ужесточением экологических требований со стороны государства.

Результаты исследования и их обсуждение. Первый этап исследований – анализ развития золотодобывающей отрасли в современном мире, инвестиции и тренды. Мировые запасы золота сконцентрированы в более чем 100 странах мира. Информация по анализируемым официальным архивным сведениям (<https://rfgf.ru/>, <https://minfin.gov.ru/>, <https://probpalata.gov.ru/district/central/>, <https://customs.gov.ru/>, <https://www.tsnigri.ru/ru/>, <https://www.usgs.gov/>, <https://www.chinagoldgroup.com/en/1581.html>, <https://www.surbiton.com.au/>, <https://www.gob.pe/minem>, <https://www.metalsfocus.com/product/gold-focus/>, <https://www.lbma.org.uk/>, <https://www.gokhnan.ru/>, <http://goldminingunion.ru/>) представлена в табл. 1, 2 и на рис. 2–7.

На одиннадцать крупнейших стран мира (табл. 1), в том числе Россию, приходится около 62 % общемировых запасов золота. В настоящий период мировые запасы золота оцениваются в 46,3 тыс. т. Первая пятёрка стран Китай, Австралии, России, США, Канада сосредоточила 17 932 т золота, что составляет 38,7 % золота мира. Доля в мировых запасах пятёрки стран в 2020 г. соответствовала значению 39,0 %. В 2020 г. этой пятёркой стран получено 1 361 тонна золота (42,42 %), а доля в мировом производстве – 42 %.

Таблица 1 / Table 1

Запасы и производство золота в мире/ Reserves and production of gold in the world

Страна / Country	Запасы, категория / Reserves, category	Запасы, т / Reserves, tons	Доля в мировых запасах, % / Share in world reserves, %	Производство в 2020 г., т / Production in 2020, tons	Доля в мировом производстве, % / Share in world production, %/
Китай / China	Reserves	2 000	4	365	11
Австралия / Australia	Reserves	4 000	9	327	10
Россия / Russia	Запасы категорий A+B+C ₁ * / Stocks of categories A+B+C ₁ *	6 732	15	309	10
США / USA	Reserves	3 000	6	190	6
Канада / Canada	Reserves	2 200	5	170	5
Гана / Ghana	Reserves	1 000	2	140	4
Индонезия / Indonesia	Reserves	2 600	6	130	4
Мексика / Mexico	Reserves	1 400	3	100	3
ЮАР / South Africa	Reserves	2 700	6	90	3
Узбекистан / Uzbekistan	Reserves	1 800	4	90	3
Перу / Peru	Reserves	2 700	6	88	3
Прочие / Other	Reserves	16 200	35	1 211	38
Мир / World	Запасы / Reserves	46 332	100	3 209	100

Примечание: * разрабатываемых и подготавливаемых месторождений

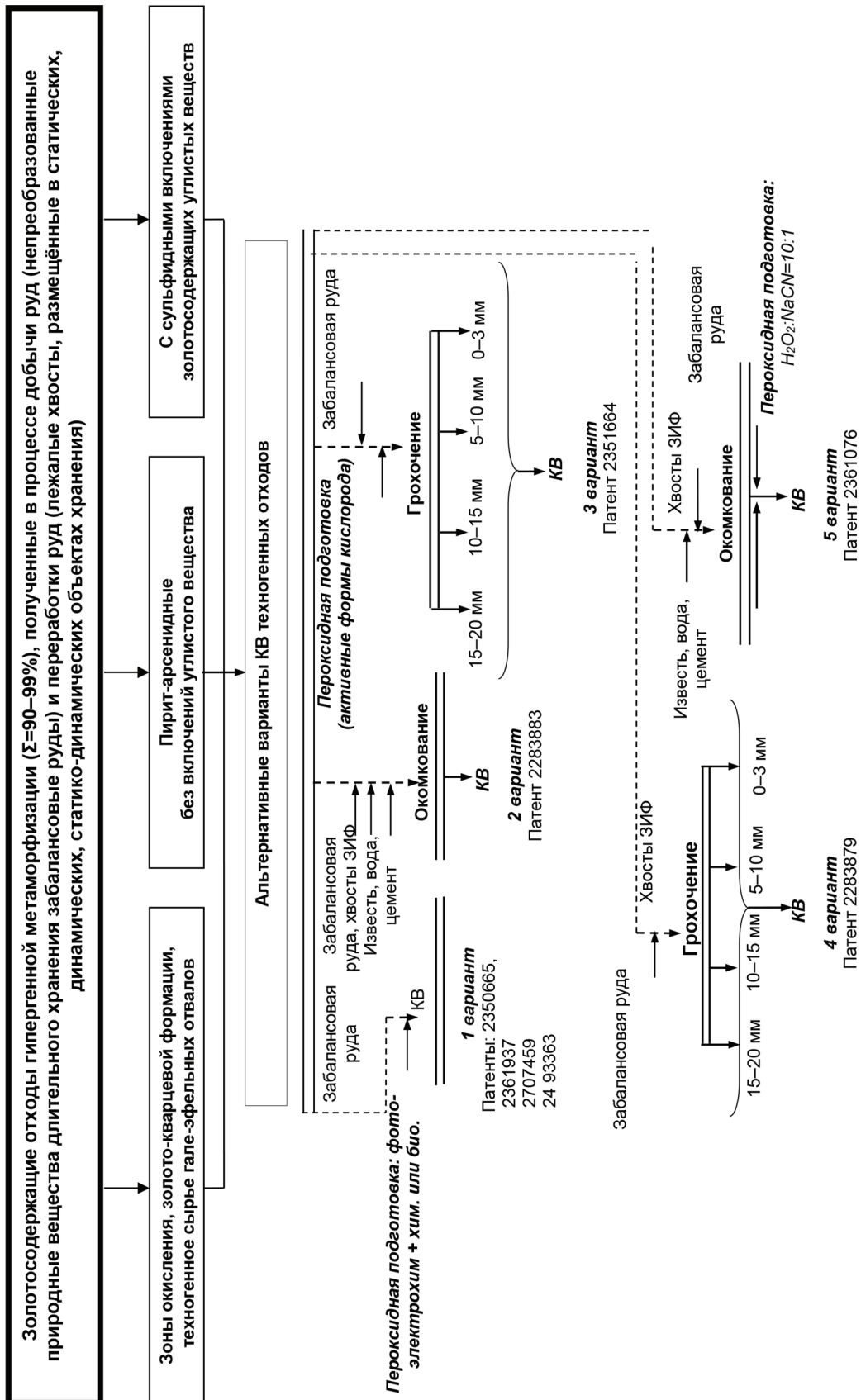


Рис. 1. Примеры запатентованных технологий КВ золота из техногенных отходов горных предприятий Забайкальского края / **Fig. 1.** Examples of patented technologies for obtaining gold from man-made waste from mining enterprises of the Transbaikal Region

Условно можно считать, что крупнейшие производители мира ежедневно в среднем пополняли золотовалютные резервы своей страны: Китай – 1 т, Австралия – 0,9 т, Россия – 0,85 т, США – 0,52 т, Канада – 0,47 т.

Геологическая служба США подсчитала, что в мире при сохранении текущих темпов добычи, запасы в недрах большинства стран исчерпаются к 2034 г. Поскольку доля запасов золота в России самая большая в мире (15 %), поэтому разведанные запасы исчерпаются через 36 лет. Это указывает на то, что цена на золото будет только расти.

По качеству отечественные золоторудные месторождения, в целом, сопоставимы с мировыми. Российской империей, Советским Союзом и Российской Федерацией за весь период существования и до настоящего времени добыто 19 тыс. т золота. На протяжении трёхлетнего периода (с 2019 по 2021 г.) доля России в мировом производстве золота постоянно росла: 2019 г. – 9,15 %; 2020 г. – 9,52 %; 2021 г. – 11, 1 % (https://igeotech.ru/wp-content/uploads/2021/04/2021-04-20-prezentacziya-mi_zit-2021-final.pdf <https://igeotech.ru>).

Динамика биржевых цен на золото 2011–2021 гг. (рис. 2) показывает, что с 2012 по 2015 г. происходит резкое их снижение на 30,49 % (с 1669 до 1160 долл./тр. унц.), что было вызвано перемещением инвесторами средств из золотых активов в рынок акций. Далее (2015–2018) наблюдалась относительная стабилизация цен с последующим с 2019 г. их увеличением. Прослеживается превышение цены на золото в 2021 г. на 15,74 % по сравнению с первоначальной точкой отсчёта (2011).

По состоянию на конец июля 2023 г. количество золота, хранящегося в лондонских хранилищах, составляло 8864 т (на 0,01 % меньше, чем в предыдущем месяце) на сумму 561,6 млрд долл., что соответствует приблизительно 709154 золотым слиткам (<https://www.lbma.org.uk>).

За десять лет (2011–2020) добыча золота из недр в России увеличилась в 1,63 раза (с 262,2 до 427,2 т), производство золота из минерального сырья – на 57,75 % (с 202,6 до 319,6 т) (рис. 3). Переработка вторичного сырья по сравнению с 2011 г. выросла в четыре раза; стимулом для этого послужил рост цен на золото в рублях.

Следует отметить, что в 2020 г. добыча золота из недр снизилась по сравнению с 2019 годом на 1,73 % (с 434,6 до 427,2 т), что связано с пандемией COVID-19. Экспорт золота в концентрате с 2011 по 2020 г. увеличился в 3,42 раза (с 3,1 до 10,6 т). Динамика

добычи золота из недр по типам месторождений в 2011–2020 гг. представлена на рис. 4.

Основные центры золотодобычи России сосредоточены на Дальнем Востоке и в Сибири (рис. 5). Интенсивное развитие золотодобывающей промышленности на этих территориях приводит к накоплению гигантских объемов отходов, которые, занимая большие земельные площади.

Забайкальский край относится к числу регионов ДФО, где добывается более 5 т золота в год. В России число «формально самостоятельных» золотодобывающих компаний выросло с 621 в 2020 г. до 672 в 2021 (+ 51 компания, +8 % к 2020). К основным регионам, в которых увеличилось количество участников добычи, возобновлена добыча, относятся Амурская область (+20 компаний), Магаданская область (+15 компаний), Забайкальский край (+11 компаний). При этом доля десятки крупнейших компаний в общем объеме добычи несколько понизилась (с 66 % в 2020 до 62,5 % в 2021 гг.). Совокупный объем добытого компаниями золота понизился (с 211 до 208 т). Распределение добычи золота между субъектами Российской Федерации и основные месторождения золота показаны на рис. 6.

ТОП-10 российских регионов по производству золота в 2015–2021 гг., объёмы добычи и доля в общем объеме производства золота в РФ приведены в табл. 2.

Долгосрочный прогноз производства золота в России (по проектам и типам минерального сырья) показан на рис. 7.

Следует отметить, что впервые в соответствии с государственной программой Российской Федерации «Воспроизводство и использование природных ресурсов» (Постановление Правительства РФ от 15.04.2014 № 322 (ред. от 18.12.2021), по долгосрочным прогнозам (2018–2030), планируется в 2024 г. начать отработку техногенного сырья, объёмы которого постепенно к 2030 г. будут увеличиваться.

В России и за рубежом для извлечения золота из руды применяется эффективный способ цианидного выщелачивания, в том числе кучного выщелачивания (КВ). Следовательно, добыча золота традиционно является инвестициями с повышенной «токсичностью» в плане рисков воздействия на окружающую среду (природную и производственную). Поэтому приоритетами компаний лидеров горнодобывающего сектора в мире в настоящее время является внедрение технологий, снижающих экологические риски и повышающих промышленную безопасность (рис. 8).

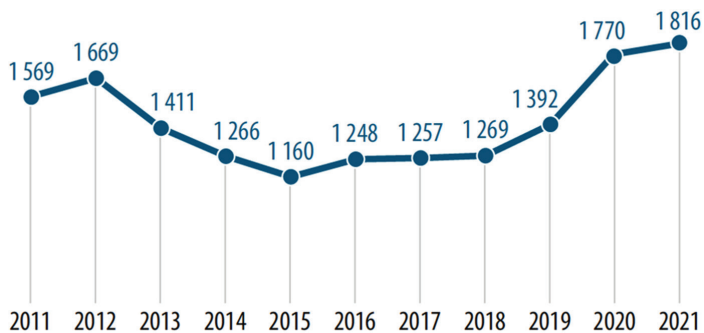


Рис. 2. Динамика биржевых цен на золото в 2011–2021 гг., долл./тр. унц. / **Fig. 2.** Dynamics of exchange prices for gold in 2011–2021, USD/tr. oz.

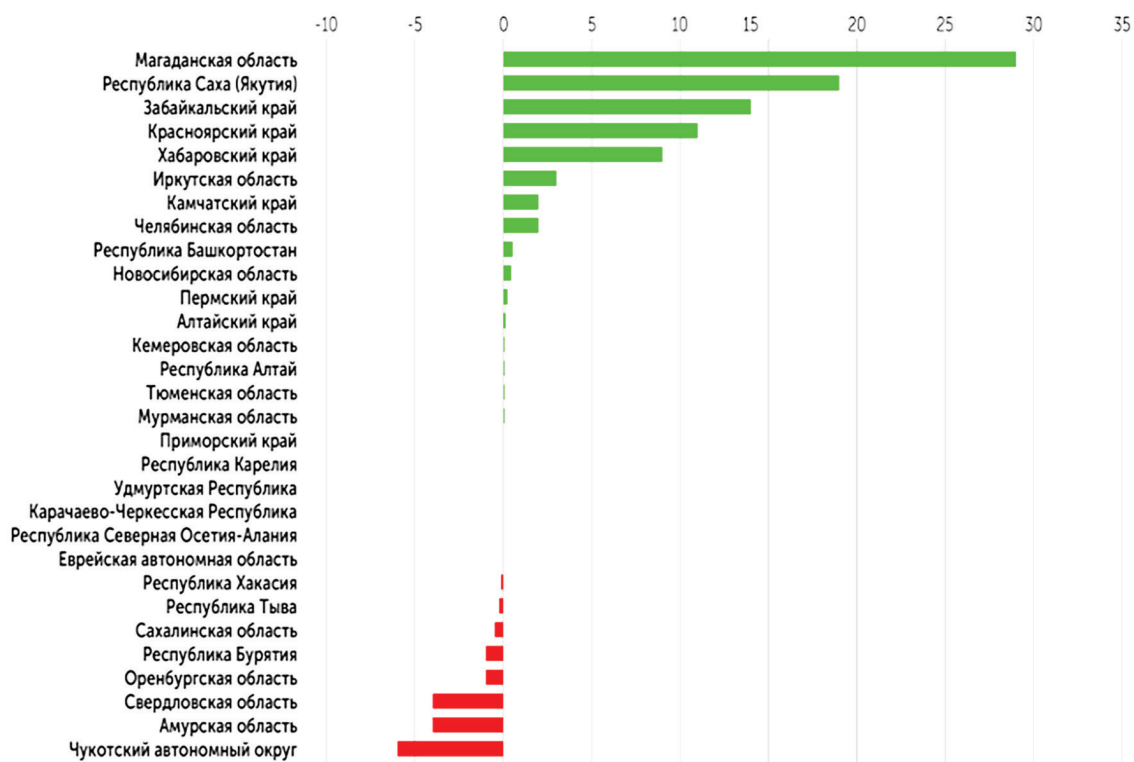


Рис. 3. Динамика добычи золота из недр, производства, экспорта золота, полученного из минерального сырья в России и производства минерального сырья в 2011–2020 гг., т / **Fig. 3.** Dynamics of gold extraction from the subsoil, production, export of gold obtained from mineral raw materials in Russia and production of mineral raw materials in 2011–2020, tons

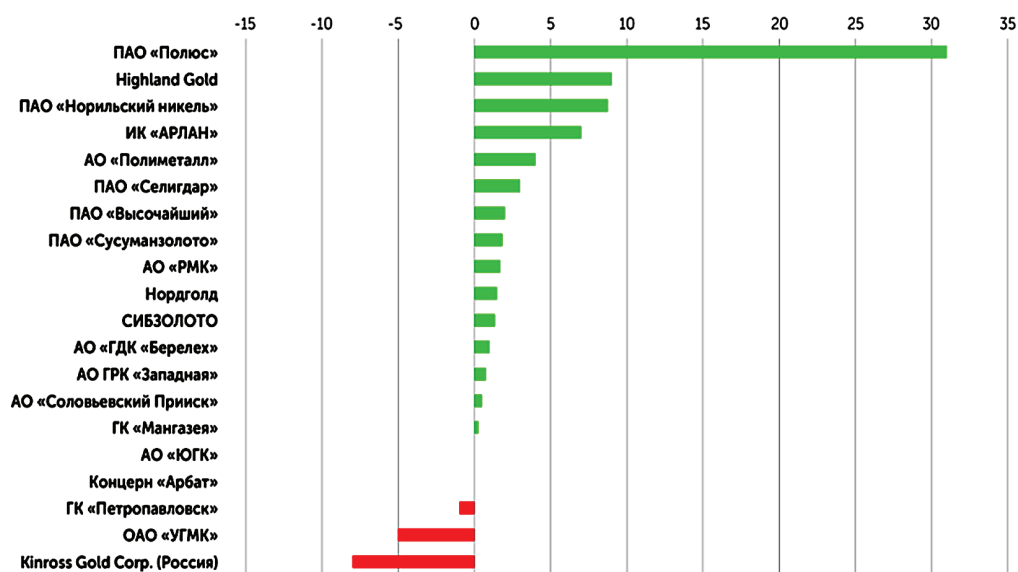
Примечание: * включая золото в золотосодержащих концентратах, перерабатываемых за пределами России



Рис. 4. Динамика добычи золота из недр по типам месторождений в 2011–2020 гг., т / **Fig. 4.** Dynamics of gold extraction from the subsurface by type of deposits in 2011–2020, tons



а)



б)

Рис. 5. Производство золота в России: а) по регионам в 2021 г. по отношению к 2015 г. т; б) рейтинг крупнейших производителей в 2015–2021 гг. (ТОП-20), т / **Fig. 5.** Gold production in Russia: а) by region in 2021 in relation to 2015, t; б) rating of the largest producers in 2015–2021 (TOP 20), t

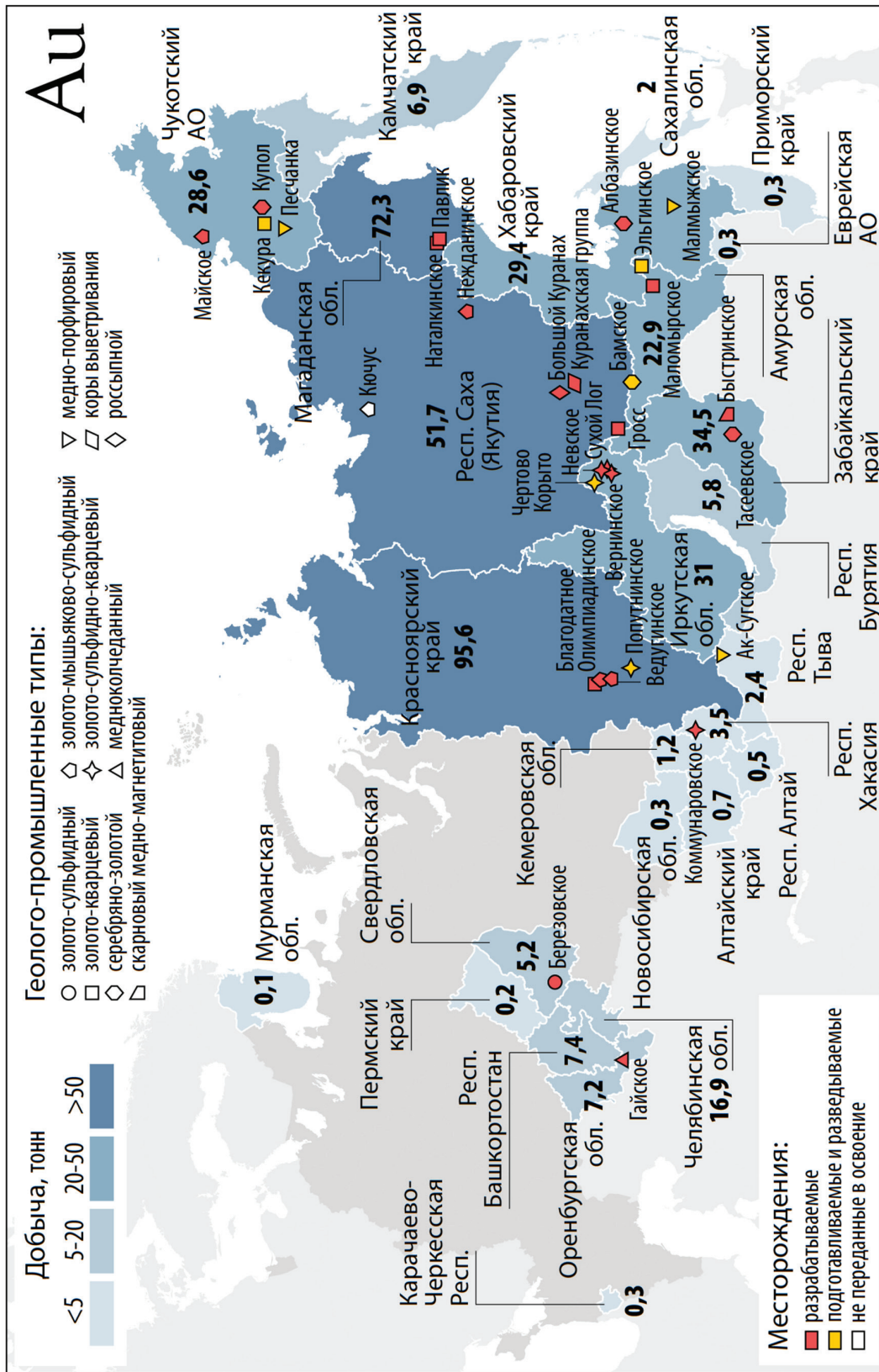


Рис. 6. Распределение добычи золота между субъектами Российской Федерации (тонн) и основные месторождения золота / Fig. 6. Distribution of gold production between the subjects of the Russian Federation (tons) and the main gold deposits

Таблица 2 / Table 2

ТОП-10 российских регионов по производству золота 2015–2021 гг., т / TOP 10 Russian regions for gold production 2015–2021, t

№	Регион / Region	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1	Красноярский край / Krasnoyarsk region	52	61	68	70	70	67	63
2	Магаданская область / Magadan region	23	26	32	38	47	50	53
3	Республика Саха (Якутия) / Republic of Sakha (Yakutia)	25	24	22	30	38	42	43
4	Хабаровский край / Khabarovsk region	18	20	24	27	26	25	27
5	Иркутская область / Irkutsk region	22	23	22	25	25	26	25
6	Чукотский автономный округ / Chukotka Autonomous district	31	29	25	23	25	25	24
7	Забайкальский край / Transbaikal region	11	12	12	16	20	21	25
8	Амурская область / Amur region	28	23	25	23	28	29	24
9	Челябинская область / Chelyabinsk region	10	10	11	10	10	11	11
10	Свердловская область / Sverdlovsk region	11	11	10	10	8	7	7
	Объём добычи ТОП-10 / Production volume of the TOP 10	231	237	251	272	297	303	304
	Доля регионов ТОП-10 в общем объёме добычи в РФ / The share of TOP-10 regions in the total volume of production in the Russian Federation	90 %	90 %	92 %	92 %	93 %	92 %	92 %

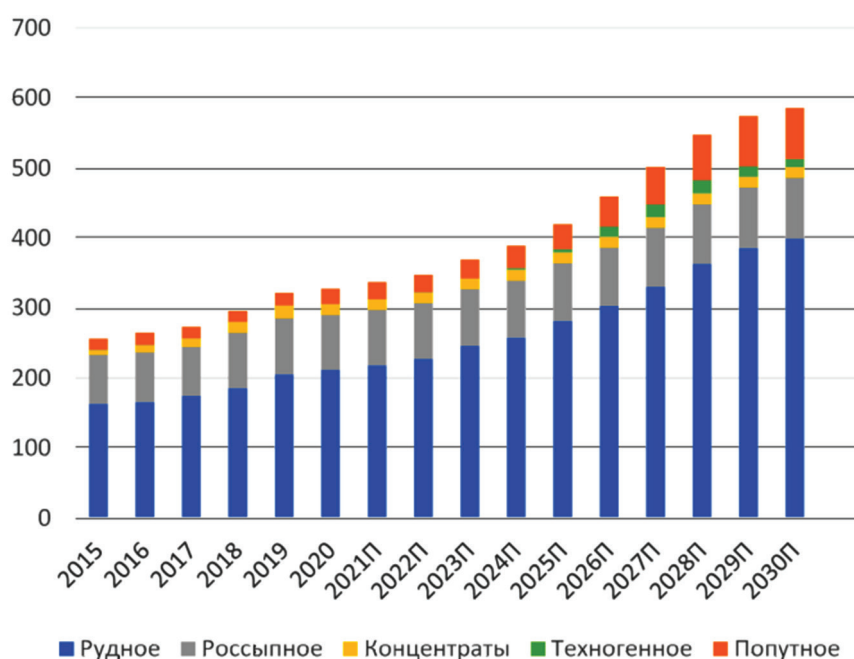


Рис. 7. Долгосрочный прогноз производства золота в России /
Fig. 7. Long-term forecast of gold production in Russia

Второй этап исследований – экспериментальные исследования в лабораторных условиях технологии выщелачивания золота из шихты отходов горных предприятий на основе применения экологоэкономических методов интенсификации процесса выщелачивания.

В декабре 2022 г. на базе аналитической лаборатории ООО «ГРК Дархан» (Забайкальский край) проведено тестирование технологии переработки шихты отходов горных предприятий (забалансовая руда: лежалые хвосты в соотношении, равном 1:4) на основе

экологоэкономических методов интенсификации процесса выщелачивания золота. Результаты тестирования представлены ранее [11].

В данной статье изложены результаты исследований на укрупнённой лабораторной пробе (масса 700 кг). Разработанная технологическая схема извлечения золота из шихты отходов горных предприятий приведена на рис. 9.

Шихта состояла из забалансовой руды месторождения «Талатуй» (рудный склад забалансовой руды, штабель № 3), крупность минус 20 мм, масса 140 кг; и лежалых хвостов (ЗИФ ООО «Дарасунский рудник», керновые пробы рыхлого материала из хвостохранилища с глубины 5,5 м), 75 % класса крупности минус 0,071 мм, масса 560 кг.

Гранулометрический состав исследуемого техногенного минерального сырья представлен на рис. 10.

Зависимость извлечения золота из шахты от содержания класса 0,071 мм показана на рис. 11.

Исследования проводили при различном содержании класса крупности минус 0,071 мм в измельчённой забалансовой руде и получили следующие показатели извлечения золота: 75 % ($\epsilon^{Au} = 65,1 \%$), 80 % ($\epsilon^{Au} = 71,2 \%$), 80 % ($\epsilon^{Au} = 74,7 \%$), 90 % ($\epsilon^{Au} = 76,15 \%$), 95 % ($\epsilon^{Au} = 76,15 \%$).

Установлены зависимости извлечения золота от крупности измельчения и мето-

дов интенсификации процесса выщелачивания (рис. 12): 1 – тонкое измельчение ($\epsilon^{Au} = 76,15 \%$); 2 – добавка глета ($\epsilon^{Au} = 81,3 \%$); 3 – подача озона ($\epsilon^{Au} = 88,4 \%$). Принята оптимальная тонина помола 90 % класса крупности минус 0,071 мм.

Результаты химического анализа исходных проб лежалых хвостов ЗИФ и золотосодержащих растворов выщелачивания при использовании экологоэкономических интенсифицирующих методов: тонкое измельчение с добавкой глета, активация раствора NaCN озоном при оптимальной крупности измельчения. Режимные параметры выщелачивания приняты аналогичными тестированию [Там же]: расход свинцового глета – окислителя 1 г/кг; соотношение Ж:Т = 1:1, содержание класса минус 0,071 мм – 90 %, расход NaOH – 1 г/л. Расход цианистого натрия при использовании экологоэкономических интенсифицирующих методов сократился в 1,3 раза (с 0,4 до 0,31 кг/т).

Зависимость извлечения золота в раствор от продолжительности выщелачивания и содержания класса минус 0,071 мм показана на рис. 13.

Извлечение золота в раствор при крупности лежалых хвостов флотации, находящихся в хвостохранилище (75 %), по сравнению с хвостами, которые подвергались тонкому измельчению (90 %) увеличилось в 1,2 раза (с 10,9 до 13,1 мг/л) при оптимальной продолжительности выщелачивания 20 суток.



Рис. 8. Приоритеты компаний лидеров горнодобывающего сектора в мире / Fig. 8. Priorities of the leading companies in the mining sector in the world

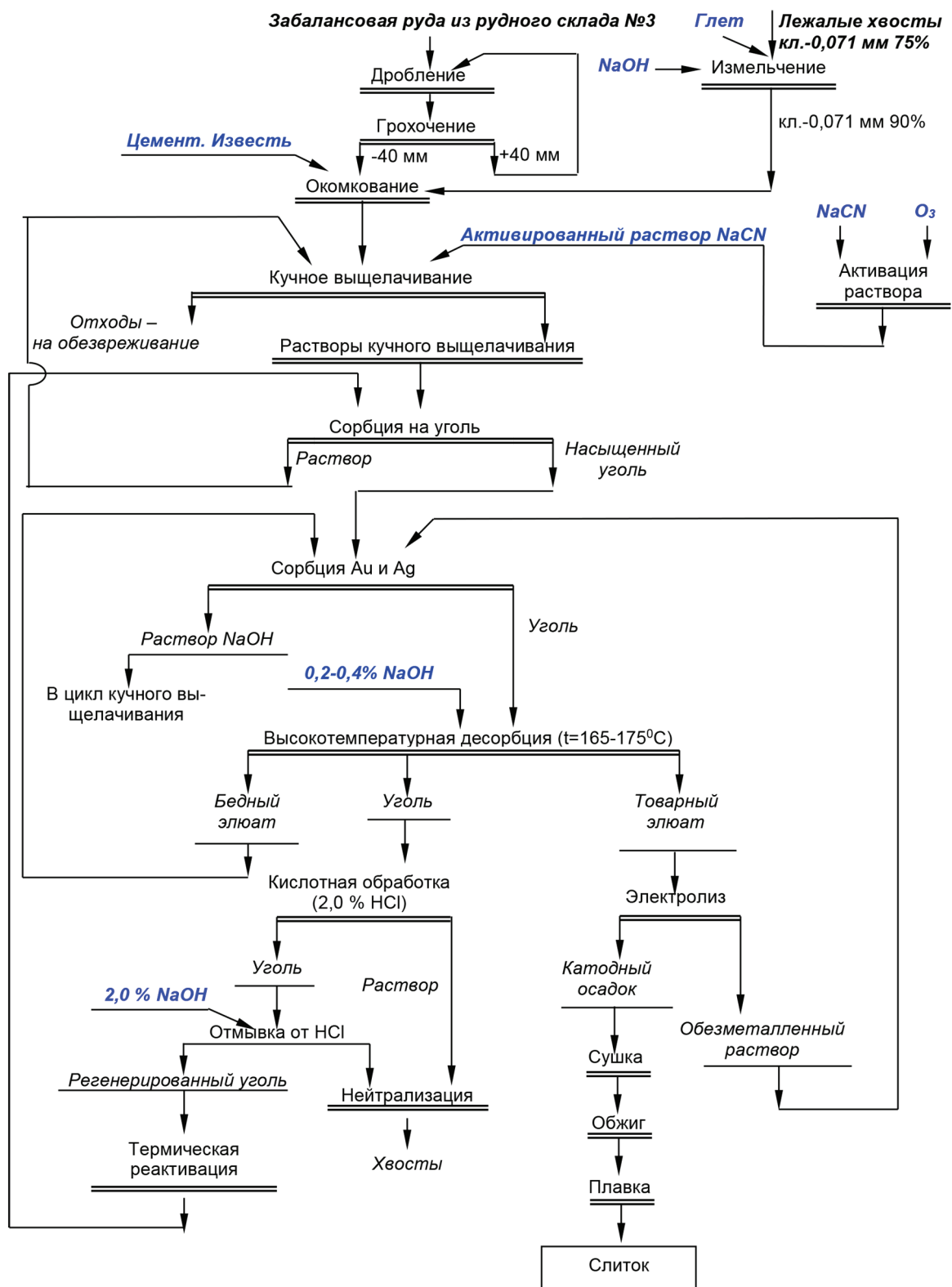


Рис. 9. Технологическая схема извлечения золота из шихты отходов горных предприятий /
 Fig. 9. Technological scheme of gold extraction from the waste charge

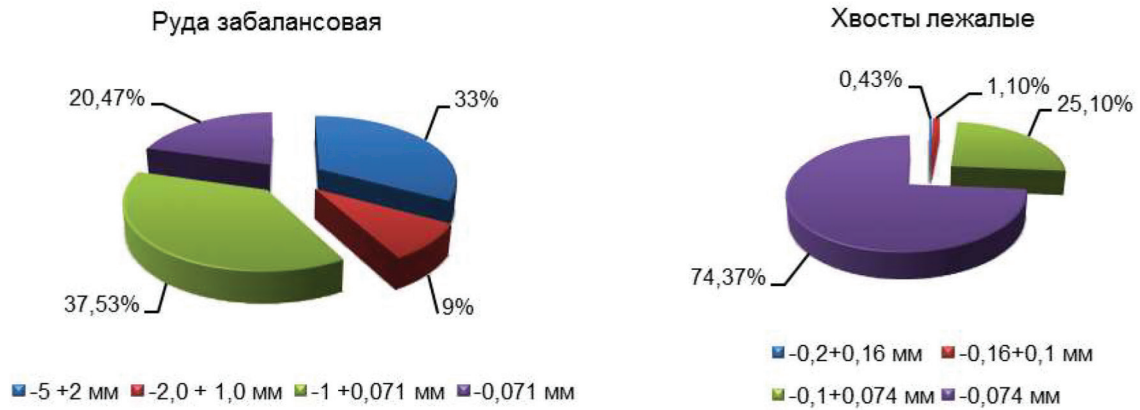


Рис. 10. Гранулометрический состав техногенного сырья /
Fig. 10. Granulometric composition of technogenic raw materials

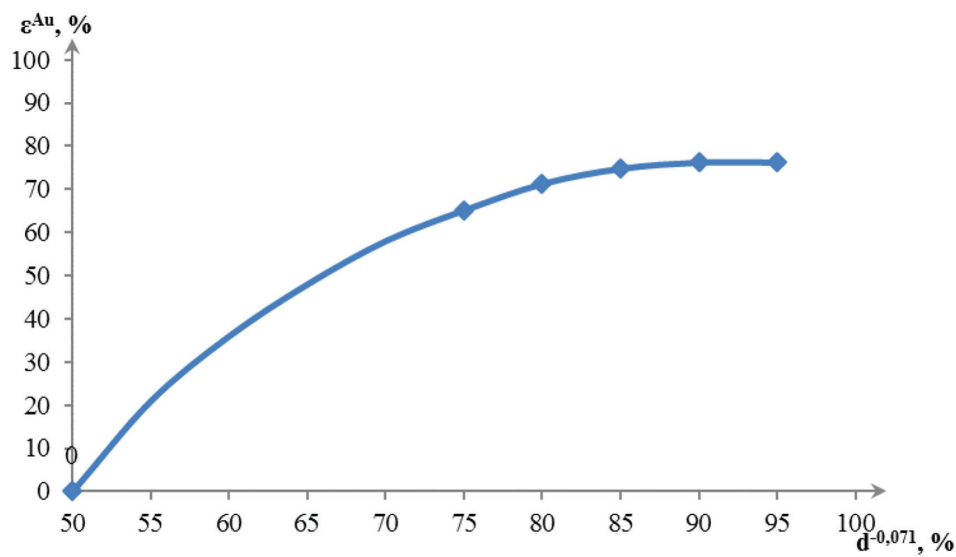


Рис. 11. Зависимость извлечения золота из шихты от содержания класса 0,071 мм /
Fig. 11. Dependence of gold extraction from the charge on the content of class 0.071 mm

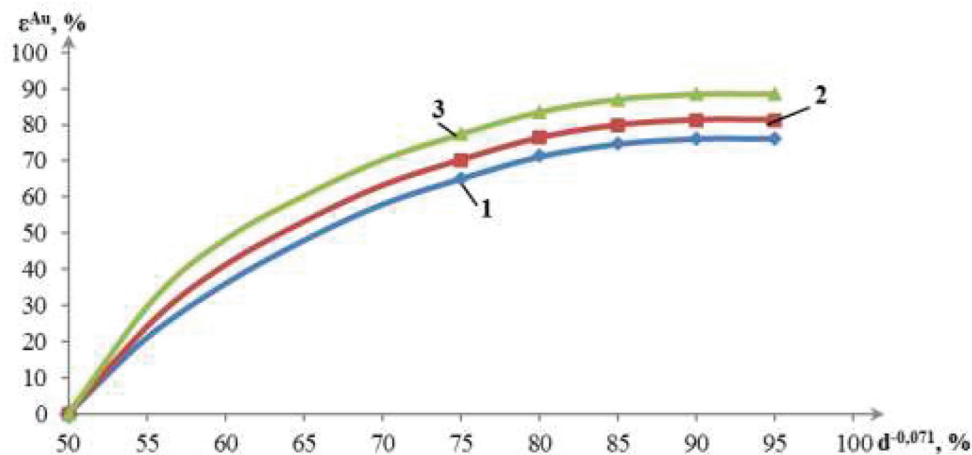


Рис. 12. Зависимость извлечения золота от крупности измельчения и методов интенсификации процесса выщелачивания: 1 – тонкое измельчение; 2 – добавка глета; 3 – активация раствора NaCN озоном /
Fig. 12. Dependence of gold extraction on the fineness of grinding and methods of intensification of the leaching process: 1 – fine grinding; 2 – addition of glet; 3 – activation of NaCN solution with ozone

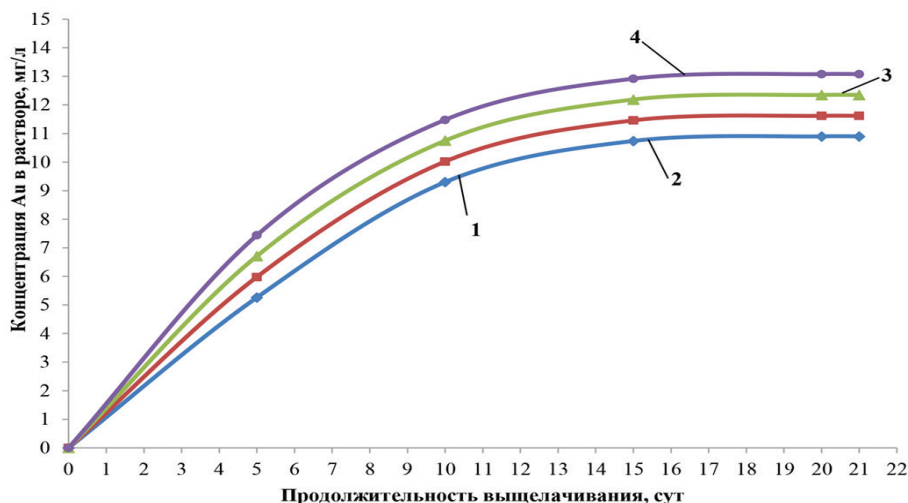


Рис. 13. Зависимость концентрации золота в растворе от продолжительности выщелачивания и содержания класса минус 0,071 мм: 1 – 75 %; 2 – 80 %; 3 – 85 %; 4 – 90 % /

Fig. 13. Dependence of the concentration of gold in solution on the content of the class minus 0.071 mm: 1 – 75 %; 2 – 80 %; 3 – 85 %; 4 – 90 %

Выводы. Впервые на государственном уровне, начиная с 2024 г., планируется обработка техногенного золотосодержащего сырья, чему способствует высокая цена на золото в мире, в связи с уменьшением запасов благородного металла. Возможны локальные повышения цены, вплоть до нового максимума. Разработана и апробирована в лабораторных условиях технология извлечения золота из шихты отходов горных предприятий добычи и переработки (упорного минерального сырья) на основе применения экологоэкономичных методов интенсификации. Экспериментальным путём

установлены следующие зависимости: извлечения золота от содержания класса минус 0,071 мм; концентрации золота в растворе от продолжительности выщелачивания и содержания класса минус 0,071 мм; извлечения золота от крупности измельчения и методов интенсификации процесса выщелачивания: тонкое измельчение; добавка глета; активация раствора NaCN озонном. Извлечение золота в раствор составило 88,4 %. Расход цианистого натрия при использовании экологоэкономичных интенсифицирующих методов сократился в 1,3 раза (с 0,4 до 0,31 кг/т).

Список литературы

1. Верховина В. А., Тимофеева С. С., Верховина Е. В., Шкетова Л. И. Исследование биотехнологической переработки сульфидной золотосодержащей руды // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9, № 1. С. 109–117. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-1-109-117.
2. Голик В. И., Комашенко В. И. Практика выщелачивания металлов из отходов переработки руд // Известия Тульского государственного университета. 2016. № 3. С. 13–22.
3. Горлова О. Е., Шадрюнова И. В., Жилина В. А., Чекушина Т. В. Повышение полноты извлечения золота из лежалых отходов переработки золотосодержащих руд // Известия Тульского государственного университета. 2020. № 1. С. 193–210. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-193-210.
4. Конгар-Сюрюн Ч., Иванников А., Хайрутдинов А., Тюляева Ю. Геотехнология с использованием композиционных материалов из техногенных отходов – парадигма устойчивого развития // Материалы сегодня: Труды. 2021. Т. 38. С. 2078–2082. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.145.
5. Мязин В. П., Литвинцев С. А. Повышение эффективности гравитационного извлечения золота из комплексных золотополиметаллических руд // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41, № 1. С. 126–136.
6. Рубцов Ю. И. Обоснование скоростного режима растворения металла в условиях системного подхода // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. № 7. С. 62–69.
7. Рубцов Ю. И., Трубачев А. И., Воронов Е. Т., Лавров А. Ю., Лаврик А. В. Интенсификация извлечения дисперсного и тонковкрапленного серебра при цианидном кучном выщелачивании золота // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26, № 8. С. 40–48.
8. Секисов А. Г., Рубцов Ю. И., Лавров А. Ю., Трубачев А. И., Рассказова А. В. Использование фотохимического и электролитического процессов при выщелачивании золота из техногенно-трансформи-

рованного минерального сырья // Вестник Забайкальского государственного университета. 2019. № 7. С. 70–83.

9. Тимофеева С. С., Ульрих Д. В., Тимофеев С. С. Фитомайнинг как технология ревитализации территории меднорудных месторождений Южного Урала // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № S6. С. 3–16. DOI: 10.25018/02361493-2020-1-6-3-16.

10. Шумилова Л. В., Хатькова А. Н., Размахнин К. К. Разработка комбинированной технологии получения сплава золота лигатурного из отходов разного вида // *Металлург*. 2022. № 9. С. 117–124. DOI: 10.52351/00260827-2022-09-117.

11. Шумилова Л. В., Хатькова А. Н., Размахнин К. К., Простакишин М. Ф. Извлечение золота и серебра из шихты отходов горных предприятий // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 2. С. 79–90. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-2-79-90.

12. Dinh T., Dobo Z., Kovacs H. Phytomining of rare earth elements. A review // *Chemosphere*. 2022. Vol. 297. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134259.

13. Jovanovic G., Randelovic D., Markovic B., Sokic M. Overview of technologies for Zn extraction from hyperaccumulating plants: Current state of research and future directions // *Journal of Mining and Metallurgy*. 2022. Vol. 58, no. 1. P. 29–38. DOI: 10.5937/jmma2201029J.

14. Kumari P., Kumar P., Kumar T. An overview of phytomining: a metal extraction process from plant species // *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 2020. Vol. 6, no. 12. P. 1367–1376. DOI: 10.5281/zenodo.4066900.

15. Kurniawan R., Henny C., Satya A. Identification of potential phytoaccumulator plants from tailings area as a gold phytomining agent // *Journal of Ecological Engineering*. 2022. Vol. 23, no. 1. P. 169–181. DOI: 10.12911/22998993/143978.

16. Pavolová H., Čulková K., Šimková Z., Seňová A., Kudelas D. Contribution of mining industry in chosen EU countries to the sustainability issues // *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 7. DOI: 10.3390/su14074177.

17. Sinha R., Singh A. K., Baudh K., Sharma T. R., Sharma P. Phytomining: a sustainable approach for recovery and extraction of valuable metals // *Phytoremediation of Abandoned Mining and Oil Drilling Sites*. Elsevier. 2021. P. 487–506. DOI: 10.1016/B978-0-12-8212004.00013-3.

18. Tomazinakis S., Valakas G., Gaki A., Damigos D., Adam K. The importance and challenges of sustainable development for the raw materials sector: the views of key stakeholders in three ESEE countries // *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 7. DOI: 10.3390/su14073933.

References

1. Verkhovzina V. A., Timofeeva S. S., Verkhovzina E. V., Shketova L. I. Research of biotechnological processing of sulfide gold ore. *Izvestiya vuzov. Applied chemistry and biotechnology*, vol. 9, no. 1, pp. 109–117, 2019. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-1-109-117. (In Rus.).

2. Golik V. I., Komashchenko V. I. The practice of leaching metals from ore processing waste. *Izvestiya Tula State University*, no. 3, pp. 13–22, 2016. (In Rus.).

3. Gorlova O. E., Shadrinova I. V., Zhilina V. A., Chekushina T. V. Increasing the completeness of gold extraction from stale waste of processing of gold-bearing ores. *Proceedings of the Tula State University*, no. 1, pp. 193–210, 2020. DOI: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-193-210. (In Rus.).

4. Kongar-Suryun Ch., Ivannikov A., Khairutdinov A., Tyulyaeva Yu. Geotechnology using composite materials from man-made waste – a paradigm of sustainable development. *Materials today: Proceedings*, vol. 38, pp. 2078–2082, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.145. (In Rus.).

5. Myazin V. P., Litvintsev S. A. Improving the efficiency of gravitational extraction of gold from complex gold-polymetallic ores. *Proceedings of the Siberian secession RAS. Geology, exploration and development of mineral deposits*, vol. 41, no. 1. pp. 126–136, 2018. (In Rus.).

6. Rubtsov Yu. I. Justification of the high-speed mode of metal dissolution in the conditions of a systematic approach, article. *Bulletin of the Transbaikal State University*, no. 7, pp. 62–69, 2019. (In Rus.).

7. Rubtsov Yu. I., Trubachev A. I., Voronov E. T., Lavrov A. Yu., Lavrik A. V. Intensification of the extraction of dispersed and fine-grained silver during cyanide heap leaching of gold. *Bulletin of the Transbaikal State University*, 2020, vol. 26, no. 8, pp. 40–48. (In Rus.).

8. Sekisov A. G., Rubtsov Yu. I., Lavrov A. Yu., Trubachev A. I., Rasskazova A. V., The use of photochemical and electrolytic processes in the leaching of gold from technogenically transformed mineral raw materials. *Bulletin of the Transbaikal State University*, no. 7, pp. 70–83, 2019. (In Rus.).

9. Timofeeva S. S., Ulrich D. V., Timofeev S. S. Phytomining as a technology of revitalization of the territory of copper ore deposits of the Southern Urals. *Mining information and analytical Bulletin*, no. S6, pp. 3–16, 2020. DOI: 10.25018/02361493-2020-1-6-3-16. (In Rus.).

10. Shumilova L. V., Khatkova A. N., Razmakhnin K. K. Development of a combined technology for obtaining a ligature gold alloy from various types of waste. *Metallurg*, no. 9, pp. 117–124, 2022. DOI: 10.52351/00260827-2022-09-117. (In Rus.).

11. Shumilova L. V., Khatkova A. N., Razmakhnin K. K., Prostakishin M. F. Extraction of gold and silver from the waste charge of mining enterprises. *Bulletin of the Transbaikal State University*, vol. 29, no. 2, pp. 79–90, 2023. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-2-79-90. (In Rus.).
12. Dinh T., Dobo Z., Kovac H. Phytomining of rare earth elements. Overview. *Chemosphere*, vol. 297, 2022. DOI: 10.1016/J.chemosfega.2022.134259. (In Eng.).
13. Yovanovich G., Randelovich D., Markovich B., Sokich M. Review of technological application of knowledge from hyperaccumulation installations: fluid state research and direction for the future. *Journal of Big Business and Metrology*, vol. 58, no. 1, pp. 29–38, 2022. DOI: 10.5937/jmma2201029J. (In Eng.).
14. Kumari P., Kumar P., Kumar T. Review of phytomining: the process of extracting metals from plant species. *Journal of New Technologies and Innovative Research*, vol. 6, no. 12, pp. 1367–1376, 2020. DOI: 10.5281/zenodo.4066900. (In Eng.).
15. Kurniawan R., Henny S., Satya A. Identification of potential phytoaccumulator plants from the tailings storage area as a means for gold mining. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 169–181, 2022. DOI: 10.12911/22998993/143978. (In Eng.).
16. Pavlova H., Chulkova K., Shimkova Z., Seneva A., Kudelas D. Contribution of the mining industry in individual EU countries to solving problems of sustainable development. *Sustainable development*, vol. 14, no. 7, 2022. DOI: 10.3390/su14074177. (In Eng.).
17. Sinha R., Singh A. K., Bodd K., Sharma T. R., Sharma P. Phytomining: a sustainable approach to the restoration and extraction of valuable metals. *Phytovestiblishment of abandoned mining sites and oil drilling*. Elsevier, pp. 487–506, 2021. DOI: 10.1016/B978-0-12-8212004.00013-3. (In Eng.).
18. Tomazinakis S., Valakas G., Gaki A., Damigos D., Adam K. The importance and ways to achieve sustainable development for the raw materials sector: a set of key factors for an interested world in three EU countries. *Sustainable Development*, vol. 14, no. 7, 2022. DOI: 10.3390/su14073933. (In Eng.).

Информация об авторах

Шумилова Лидия Владимировна, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры водного хозяйства, экологической и промышленной безопасности, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; shumilovalv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, геоэкология, обращение с отходами, экологическая безопасность.

Хаткова Алиса Николаевна, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры химии, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; alisa1965.65@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6527-0026>. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, геоэкология, обращение с отходами, химические технологии.

Размахнин Константин Константинович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры техносферной безопасности, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; constantin-const@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2944-7642>. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, геоэкология, обращение с отходами.

Простакишин Михаил Федорович, исполнитель проекта РНФ 22-17-00040, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; m.prostakishin@gmail.com. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, гидromеталлургия, инновационные технологии, экоинженерия.

Information about the author

Shumilova Lidiya V., doctor of engineering sciences, associate professor, professor of the department of water management, environmental and industrial safety, Transbaikal State University, Chita, Russia; shumilovalv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5991-9204>. Research interests: mineral processing, geoecology, waste management, environmental safety.

Khatkova Alisa N., doctor of engineering sciences, professor, professor of the department of chemistry, Transbaikal State University, Chita, Russia; alisa1965.65@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6527-0026>. Research interests: mineral processing, geoecology, waste management, chemical technologies.

Razmakhnin Konstantin K., doctor of engineering sciences, associate professor, professor of the department of technosphere safety, Transbaikal State University, Chita, Russia; constantin-const@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2944-7642>. Research interests: mineral processing, geoecology, waste management.

Prostakishin Mikhail Fedorovich, executor of the RNF project 22-17-00040, Transbaikal State University, Chita, Russia; m.prostakishin@gmail.com. Research interests: mineral processing, hydrometallurgy, innovative technologies, eco-engineering.

Вклад авторов в статью

Л. В. Шумилова – разработка идеи исследования, анализ разработанности темы, непосредственное руководство экспериментальными исследованиями, анализ полученных результатов, разработка технологической схемы, формулировка выводов, подбор библиографии, написание текста.

А. Н. Хатькова – общее руководство работой.

К. К. Размахнин – обработка результатов исследований с применением методов прикладной математики, математической статистики, программ Microsoft Excel, STATISTICA.

М. Ф. Простакишин – исполнитель экспериментальных работ, подготовка отчёта проведения экспериментальных исследований на перколяторах.

The authors` contribution to the article

L. V. Shumilova – development of the research idea; analysis of the topic development, direct management of experimental research, analysis of the results obtained, development of the technological scheme, formulation of conclusions, selection of bibliography, writing the text.

A. N. Khatkova – general management of the work.

K. K. Razmakhnin – processing of research results using methods of applied mathematics, mathematical statistics, programs Microsoft Excel, STATISTICA.

M. F. Prostakishin is a performer of experimental works, preparation of a report on conducting experimental studies on percolators.

Для цитирования

Шумилова Л. В., Хатькова А. Н., Размахнин К. К., Простакишин М. Ф. Исследование экологощадящих методов повышения извлечения золота из упорного минерального сырья // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 3. С. 74–90. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-3-74-90.

For citation

Shumilova L. V., Khatkova A. N., Razmakhnin K. K., Prostakishin M. F. Research of environmentally friendly methods of increasing the extraction of gold from stubborn mineral raw materials // Transbaikal State University Journal. 2023. Vol. 29, no. 3. P. 74–90. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-3-74-90.