

Анализ современного состояния способов переработки техногенного золотосодержащего сырья

© А.О. Василькова*, Н.В. Васильков**, О.Д. Хмельницкая*, Г.И. Войлошников*

*АО «Иргиредмет», г. Иркутск, Россия

**Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель – литературный обзор существующих способов переработки техногенного сырья (рудных отвалов прошлых лет, лежалых хвостов обогатительных фабрик, шлаков металлургического производства и т.п.), содержащих цветные и благородные металлы и накопленных практически во всех подотраслях цветной металлургии. Анализ существующих технологий переработки техногенного сырья (пиритные огарки и хвосты флотации обогатительных фабрик), которые включают в себя обогатительные, пиро- и гидрометаллургические и комбинированные способы извлечения ценных компонентов, проводился на основе обзора известных литературных и информационных источников. Показано, что обогатительные (грохочение, обесшламливание в гидроциклоне, обогащение на концентрационном столе, магнитно-жидкостная сепарация, флотация), пирометаллургические и комбинированные способы для извлечения драгоценных металлов из такого типа сырья являются нерентабельными. Наиболее удовлетворительные результаты были получены при использовании гидрометаллургических способов извлечения ценных компонентов из техногенного сырья. В качестве выщелачивающего агента были испытаны различные растворители, такие как цианид натрия, тиокарбамид, тиосульфат и сульфит натрия. Цианирование оказалось наиболее эффективным способом извлечения благородных металлов из техногенного сырья, но процесс характеризовался высоким расходом цианида натрия. Поэтому поиск способа извлечения ценных компонентов из таких проблемных продуктов необходим для того, чтобы сделать их переработку более рентабельной за счет уменьшения потребления цианида при сохранении показателя извлечения золота. В результате проведенного анализа сделан вывод о перспективности данного сырья для извлечения цветных и благородных металлов с применением гидрометаллургических технологий. Сделан вывод о целесообразности поиска рационального способа переработки техногенного золотосодержащего сырья для того, чтобы сделать технологию более рентабельной для извлечения ценных компонентов.

Ключевые слова: металлургия благородных металлов, техногенное сырье, пиритные огарки, хвосты флотации, цианирование

Для цитирования: Василькова А.О., Васильков Н.В., Хмельницкая О.Д., Войлошников Г.И. Анализ современного состояния способов переработки техногенного золотосодержащего сырья. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 1. С. 97–107. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-97-107>

Analysis of the current state of technologies in the field of recycling technogenic gold-containing raw materials

Anastasiya O. Vasilkova*, Nikolay V. Vasilkov**,
Olga D. Khmel'nitskaya*, Grigoriy I. Voyloshnikov*

*Irgiredmet JSC, Irkutsk, Russia

**Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: In this article, we review existing approaches to recycling technogenic raw materials (ore dumps, metallurgical production slag, mill tailings of ore-dressing plants, etc.), containing non-ferrous and noble metals, which are accumulated in almost non-ferrous metallurgy industries. An analysis of existing technologies for processing technogenic raw materials (pyrite cinders and flotation tailings of concentration plants), which include enrichment, pyro- and hydrometallurgical and combined ways of extracting valuable components, was conducted on the basis of a review of published sources. It was shown that enrichment (screening, desliming in a hydrocyclone, enrichment using a concentration table, magnetic-liquid separation, flotation), pyrometallurgical and combined ways for extracting noble metals from this type of raw materials are unprofitable. The most satisfactory results were obtained using hydrometallurgical methods to extract valuable components from technogenic raw materials. Various solvents, such as sodium cyanide, thiocarbamide, sodium thiosul-

phate and sodium sulphite were tested as leaching agents. Cyanation proved to be the most effective way to extract noble metals from technogenic raw materials; however, this process is characterised by a high consumption of sodium cyanide. Therefore, it is of importance to discover an approach to extracting valuable components from such problematic products in order to make their processing more cost-effective by reducing cyanide consumption while maintaining gold extraction. According to the obtained results, gold-containing raw materials are promising in terms of extraction of non-ferrous and noble metals using hydrometallurgical technologies. Future research should identify rational methods for processing technogenic gold-containing raw materials in order to make the technology more profitable for extracting valuable components.

Keywords: metallurgy of noble metals, technogenic raw materials, pyrite cinders, flotation tailings, cyanation

For citation: Vasilkova AO, Vasilkov NV, Khmel'nitskaya OD, Voyloshnikov GI. Analysis of the current state of technologies in the field of recycling technogenic gold-containing raw materials. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(1):97–107. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-1-97-107>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время значительные объемы техногенных ресурсов (рудных отвалов прошлых лет, лежалых хвостов обогащенных фабрик, шлаков металлургического производства и т.п.) накоплены практически во всех подотраслях цветной металлургии и ресурсы их постоянно пополняются. Такие объекты являются перспективными для вовлечения их в разработку из-за высокого содержания черных, цветных, редких и благородных металлов. Поэтому подбор технологии для переработки такого типа сырья является актуальной задачей на сегодняшний день.

В России суммарная доля отходов от добычи полезных ископаемых составляет 92% (около 4,6 млрд т), из них 15% (около 740 млн т) приходится на цветную металлургию и является уникальным источником цветных, редких и благородных металлов. Ценность техногенных отходов как сырья увеличивается еще и потому, что они не требуют затрат на добычу, доля которой в себестоимости получения металлов обычно весьма значительна. Эксплуатация такого вида сырья позволит поддерживать требуемый уровень производства металлов даже при значительном снижении объемов добычи металлических руд [1–13].

С учетом вышесказанного для извлечения ценных компонентов из указанного сырья разработаны различные варианты технологических схем, которые основаны на применении методов обогащения, пирометаллургических процессов, а также на их сочетании. Целью данной статьи явился обзор существующих технологий извлечения цен-

ных компонентов из таких техногенных отходов как огарки сернокислотного производства, получаемые на предприятиях химической промышленности, а также хвосты флотации медно-цинкового производства [14].

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Переработка пиритных огарков. В настоящее время в России накоплено более 30 млн т пиритных огарков. С одной стороны, пиритные огарки создают угрозу загрязнения водной и воздушной среды, с другой стороны являются ценным источником получения черных, цветных, благородных и редких металлов.

Получаемые пиритные огарки представляют собой комплексное сырье, в котором могут находиться Fe – 40–50%, Zn – 0,7–1%, Cu – 0,3–0,5%, Au – 1,1–2,1 г/т, Ag – 20–30 г/т [15].

Значительный объем исследований посвящен гравитационному обогащению пиритных огарков [16, 17]. Однако ввиду сложного минерального и химического составов, их тонкодисперсного состояния применение механических способов обогащения не позволило получить положительных результатов по извлечению железа и благородных металлов в обогащенные продукты. Подтверждением тому явились исследования, выполненные в Иркутском научно-исследовательском институте благородных и редких металлов и алмазов (АО «Иргиредмет»). Извлечение золота в концентрат составило 6,4%, серы – 7,2%, железа – 4,7%. Выход продукта находился на уровне 4,9%.

Сотрудниками Института проблем ком-

плексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук были проведены исследования по флотационному обогащению пиритных огарков [18, 19]. В концентрат удалось извлечь 65% золота, 30% серебра и 20% железа, что свидетельствует о невысокой степени концентрирования ценных компонентов в обогащенном продукте и, как следствие, получении неотвальных по содержанию металлов хвостов флотации.

Существует комбинированный метод переработки, который включает в себя предварительную сульфоагломерацию огарков с последующей флотацией полученного агломерата [20]. В результате получают медный концентрат с извлечением Cu – 75,4%, Au – 65,0% и Ag – 68,3% и пиритный концентрат с извлечением Fe – 59% и S – 48%. Предложенный вариант обогащения представляет интерес, но требует проверки в полупромышленном масштабе и проведения технико-экономических расчетов.

Итальянской фирмой «Montecatini» разработан способ переработки пиритных огарков, включающий магнетизирующий обжиг огарка и магнитную сепарацию его продуктов. Извлечение Fe в железный концентрат составляет 93,2%, который после окомкования и обжига направляют в доменный передел. Однако этот способ пригоден для пиритных огарков, не содержащих цветные и благородные металлы [21, 22].

Наиболее известным из пирометаллургических методов переработки пиритных огарков является низкотемпературный хлорирующий обжиг, с успехом применяемый в зарубежной практике [23]. Хлорирующий обжиг используется в том случае, если содержание меди превышает 0,5%. Данный метод позволяет извлечь 85–90% меди, значительную долю благородных металлов, а также обеспечивает практически полное обессеривание огарка, который может быть использован для производства чугуна.

Другим методом является высокотемпературная хлоридовозгонка цветных и благородных металлов из окатышей окислительно-го обжига. Товарной продукцией заводов, использующих данную технологию (г. Агамаса-

ки, Япония), являются медь, цинк, свинец, благородные металлы, строительный гипс и железорудные окатыши [24].

Имеется информация о проведении сульфатизирующего обжига пиритных концентратов. В сравнении с хлорирующим обжигом данный способ не обеспечивает извлечения свинца и благородных металлов [25].

В патенте [26] предложен способ переработки пиритных огарков, измельченных до крупности не более 55 мкм путем солянокислотного выщелачивания железа и цветных металлов и последующим сорбционным цианированием. Извлечение золота составило 70% [27].

Несмотря на эффективность применения пирометаллургических методов для извлечения ценных компонентов из пиритных огарков, в отечественной практике указанные технологии не используются.

Известны гидрометаллургические методы извлечения ценных компонентов из пиритных огарков.

В ЮАР для извлечения золота из пиритных огарков используют цианирование с предварительной известковой обработкой. Золото из цианистых растворов осаждают цинковой пылью. Показатели извлечения золота авторы не приводят [28, 29].

Разработана технологическая схема, включающая струйное измельчение с горячим воздухом, сернокислотное выщелачивание активированного продукта и сорбционное цианирование полученного кека. Данная технология обеспечивает извлечение золота и серебра на 80 и 89%, соответственно. Однако данная технология рентабельна для огарков при содержании в исходном продукте 3,4 г/т золота и 95 г/т серебра.

Предложен способ переработки пиритных огарков, включающий доизмельчение до крупности 95% класса минус 0,071 мм, известковую обработку с подачей воздуха, последующее двухстадийное цианирование и цементацию благородных металлов из растворов [30]. По данному методу извлечение золота составляет 61,5%, серебра – 40,5% при расходе цианистого натрия – 2,5 кг/т.

Более высокие технологические показа-

тели извлечения ценных компонентов из огарка сернокислотного производства обеспечиваются при реализации следующей технологической схемы: кислотная обработка огарка, фильтрация с отмывкой растворенных цветных металлов и последующим их осаждением, измельчение отмытого кека до крупности 95% класса минус 0,071 мм в известковой среде, аэрирование пульпы, цианирование в присутствии сорбента и обезвреживание сбросной пульпы [31]. Извлечение золота и серебра достигает 82,1 и 69,0% соответственно. Расход цианистого натрия – 1,4 кг/т. Однако предложенная технология представляется довольно сложной и требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат.

В ЮАР на перерабатывающем отходы сернокислотного завода компании «Anglo American» предприятии используется вариант с измельчением огарков в цианистой среде [32]. Извлечение золота в данной работе не приведено.

В Греции испытана тиокарбамидная технология для извлечения золота и серебра из пиритных огарков¹. Предварительно огарок измельчали и обрабатывали серной кислотой, затем подвергали тиокарбамидному выщелачиванию. Извлечение золота и серебра достигало 95 и 94%. Расход тиокарбамида составил 6,6 кг/т огарка.

В «Universitas Barcinonensis» (г. Барселона, Испания) разработан способ переработки пиритных огарков, основанный на применении газообразного хлора при обычных температуре и давлении [33]. Извлечение золота и серебра 80–90%, меди и цинка – 80%, мышьяка – 50%.

Фирмой ООО «Экомет» (г. Москва, Россия) была предложена технология переработки пиритных огарков, которая состояла в автоклавном выщелачивании ценных компонентов, последовательном извлечении железа и товарных цветных, благородных и редких металлов по сорбционно-электролизной технологии. Разработанная схема обеспечи-

вает извлечение, %: Cu – 90; Zn – 75; Fe – 98; Pb – 75; Se – 75; Te – 50; Ag – 75; Au – 90 [34].

Альтернативным вариантом предлагаемого метода извлечения ценных компонентов из пиритных огарков является технология, разработанная в Московском государственном геологоразведочном университете, основанная на использовании в качестве растворителя аммиачно-тиосульфатных растворов, обеспечивающих приемлемые уровни извлечения золота, серебра и сопутствующих меди и цинка.

Имеются данные о выщелачивании золота сернистокислыми растворами из продуктов бактериального и автоклавного выщелачивания упорных сульфидных концентратов, а также из пиритных огарков [35]. При концентрации Na_2SO_3 – 40 г/дм³ извлечение золота в раствор составляет 86,0%.

В институте АО «Иргиредмет» были проведены исследования с целью разработки рациональной технологии комплексного извлечения ценных компонентов из пиритных огарков с содержанием Au – 2,3 г/т, Ag – 40,9 г/т, Cu – 0,4%, Zn – 0,65%, крупность 82-88% класса минус 0,074 мм [36].

Первоначально были рассмотрены различные варианты подготовки данных продуктов к последующему цианированию: водная, известковая, щелочная обработки, а также их сочетание: водная и известковая, водная и щелочная обработки. Экспериментально установлено, что проведение предварительной обработки пиритных огарков растворами гидроксида натрия обеспечивает в цикле последующего цианирования извлечение золота на 73,9–80,7%. Однако в этом случае процесс характеризуется высоким расходом NaOH – 59,6 кг/т, что свидетельствует о нецелесообразности применения данного процесса для переработки пиритных огарков ввиду высокой стоимости реагента и низкого содержания золота в исследуемом продукте (2,3 г/т).

¹Котляр Ю.А., Меретуков М.А., Стрижко Л.С. Металлургия благородных металлов (в 2-х т.): учеб. пособ. Т. 1. М.: ИД «Руда и минералы», 2005. 432 с.

На основании результатов проведенных исследований была рекомендована агитационно-цианистая технология переработки пиритных огарков, включающая в себя водную отмывку от цветных металлов с последующим извлечением меди цементацией металлическим железом и цинка путем введения в раствор соды (Na_2CO_3). Благородные металлы из цианистых растворов извлекают с помощью операции цинкового осаждения. Данная технология обеспечивает извлечение Cu – 22,5%, Zn – 62,0%, Au – 52,0% и Ag – 22,0%. Расход цианида натрия составил 1,4 кг/т.

Переработка хвостов флотации полиметаллических руд. В настоящее время в хвостохранилищах обогатительных фабрик России накоплено более 250 млн. т хвостов флотации, содержащих 170,8 тыс. т меди (0,28%), 159,5 тыс. т цинка (0,26%), 45,94 т золота (0,75 г/т) и 485,5 т серебра (7,92 г/т).

В 2012–2013 гг. был проведен комплекс исследований по выявлению возможности и эффективности переработки хвостов, получаемых при обогащении полиметаллических руд на одном из предприятий Российской Федерации, обогатительными и современными гидрометаллургическими методами.

Проведенными исследованиями установлено, что гравитационное обогащение лежалых хвостов возможно. Однако недостаточно полное извлечение золота (40% при выходе концентрата 20%) и низкое содержание ценного компонента в концентратах ограничивают перспективы применения гравитационных процессов.

Флотационное обогащение лежалых хвостов с целью получения отвального по ценным компонентам продукта нецелесообразно, так как в хвостах обогащения концентрируется золото, благоприятное для гидрометаллургической переработки [37–39].

По результатам исследований перспективной признана технологическая схема, включающая цианидное выщелачивание лежалых хвостов в следующем режиме: крупность 80% класса минус 0,071 мм, концентрация NaCN – 0,03%, продолжительность цианирования – 24 ч. Извлечение золота, серебра и меди в раствор при этом составляет, соответственно, 58,43%, 32,57% и 24,65%.

Процесс цианирования хвостов сопровождается умеренным расходом цианида натрия (1,33 кг/т). При использовании операции регенерации цианида из растворов выщелачивания расход данного реагента может быть снижен до 0,78 кг/т.

В АО «Иргиредмет» были проведены исследования технологии извлечения золота из хвостов флотации полиметаллических руд с содержанием золота – 1,35 г/т, включающей прямое цианирование, гравитационное обогащение с использованием центробежных концентраторов «Knelson» и «Истомак», винтовых сепараторов, отсадочных машин и концентрационных столов. Вариант «отсадки-стол» обеспечил извлечение металла 70,8%. По результатам экспериментов предложена схема гравитационного обогащения с последующим цианированием гравеоконцентрата, обеспечивающая извлечение золота на уровне 63,4%.

Также в АО «Иргиредмет» были проведены исследования по разработке рентабельных способов извлечения цветных и благородных металлов из хвостов обогащения полиметаллической руды, полученных на еще одном предприятии Российской Федерации с содержанием компонентов: Au и Ag ~ 1,3 и 16 г/т, Cu и Zn ~ 0,13 и 0,23% [40].

Испытана возможность гравитационного и флотационного обогащения вышеуказанных хвостов флотации. Полученные данные свидетельствуют, что испытанные обогатительные методы не обеспечивают приемлемой степени концентрирования и извлечения ценных компонентов из исследуемого продукта.

Проведены опыты по окислительному обжигу и бескислородному обжигу и спеканию хвостов флотации с различными реагентами (Na_2CO_3 , CaO , NaCl , NaNO_3 и H_2SO_4) при различных температурах (200–600°C). Огарок (спек) подвергали водной отмывке и цианированию.

В бескислородном режиме извлечение цветных и благородных металлов практически не повысилось по сравнению с вариантом без пирометаллургической обработки.

При окислительном обжиге максимальное извлечение меди и цинка составило 27,2 и

24,8% соответственно, извлечение Au – 67,1%, Ag – 72,2%.

Таким образом, комбинированные пиро-, гидрометаллургические способы позволяют добиться повышения извлечения цветных и благородных металлов, но данная технология потребует больших капитальных затрат [41–43].

Также была исследована возможность прямой гидрометаллургической переработки хвостов.

Проведены опыты по извлечению цветных металлов с помощью водной отмывки, а также сернокислотному выщелачиванию измельченных хвостов и хвостов исходной крупности. Согласно полученным данным, для извлечения цветных металлов была рекомендована прямая водная отмывка, которая позволила извлечь 17,2% меди и 43,0% цинка. Доизмельчение и сернокислотное выщелачивание являются нецелесообразными, т.к. количество дополнительно извлекаемых цветных металлов весьма мало.

Для выщелачивания золота и серебра были испытаны тиокарбамидные, тиосульфатные и цианидные растворы.

Тиокарбамидное выщелачивание не обеспечило максимального извлечения золота и серебра, которое составило 10,7 и 23,7%, соответственно.

Тиосульфатное выщелачивание также оказалось неэффективным. Извлечение золота составило 10,7%, серебра – 23,7%.

Цианирование оказалось наиболее эффективным способом извлечения благородных металлов из хвостов обогащения. При умеренном расходе NaCN 1,0 кг/т и минимальном среди испытанных методов отношении Ж:Т=1:1 было получено извлечение золота 32,0%, серебра – 34,2%.

Были проведены исследования по оптимизации процесса цианирования, которые включали в себя подбор режима предварительного защелачивания отмытых хвостов и цианирования защелоченной пульпы.

На основании проведенных опытов было рекомендовано проводить защелачивание при минимальных затратах (малая продолжительность, без продувки воздуха и кислорода), т.к. продолжительность обработки и

продувка воздухом или кислородом практически не влияют на показатели извлечения золота (30,3–34,4%) и химический расход NaCN.

Цианирование хвостов характеризуется относительно большим расходом NaCN (3,4–4,1 кг/т). Отмывка исходных хвостов от водорастворимых примесей позволяет снизить расход NaCN до 2,1–2,2 кг/т. Извлечение благородных металлов практически не зависит от предварительной отмывки: в обоих случаях оно составило для золота 29,5–36,1%, для серебра – 32,2–42,8%.

Измельчение продукта до крупности 98% класса минус 0,071 мм (91% минус 30 мкм) позволило повысить извлечение золота до 41,8%, серебра – до 45,1%. Следовательно, раскрытие зерен полезных минералов с освобождением упорного золота (и серебра) начинается при шаровом измельчении хвостов флотации условно тоньше 30 мкм. Эта крупность шарового помола была принята оптимальной.

Бисерный помол хвостов до крупности более 90% класса минус 40 мкм обеспечил извлечение золота на уровне 43,4%, серебра – 57,2%; помол до 20 мкм – извлечение 49,2 и 60,5%, помол до 15 мкм – извлечение 50,0 и 61,8%, помол до 10 мкм – извлечение 53,3 и 62,5%, помол до 5 мкм – извлечение 52,2 и 62,3%. Помол до 20 мкм обеспечивает заметный прирост извлечения золота (на 15–20%) и серебра (на 20–30%). Дальнейшее измельчение до 15; 10 и 5 мкм практически не повлияло на извлечение полезных компонентов и является нецелесообразным.

Проведенные исследования показали, что данный объект является перспективным для проведения дальнейших исследований по определению возможности проведения цианирования в области ультранизких концентраций цианида натрия и разработки рациональной технологии извлечения цветных и благородных металлов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных источников показал, что существуют различные технологии переработки техногенного сырья, которые включают в себя обогащательные, гидро- и пиро-

металлургические переделы, а также комбинированные способы извлечения ценных компонентов, но все они являются нерентабельными ввиду низкого извлечения благородного металла, высокого расхода реагентов, сложной технологической схемы или ап-

паратурного оформления. Поэтому поиск рационального способа переработки таких продуктов необходим для того, чтобы сделать технологию более рентабельной для извлечения ценных компонентов.

Список литературы

1. Дюбанов В.Г., Леонтьев Л.И. Техногенные отходы черной и цветной металлургии и проблемы окружающей среды // *Экология и промышленность России*. 2011. № 4. С. 32–35.
2. Бурдонов А.Е., Зелинская Е.В., Гавриленко Л.В., Гавриленко А.А. Изучение вещественного состава глиноземсодержащего материала алюминиевых электролизеров для использования в технологии первичного алюминия // *Цветные металлы*. 2018. № 3. С. 32–38. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>
3. Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Бараускас А.Э. Анализ химического состава техногенных материалов производства первичного алюминия для поиска рациональных методов их переработки // *Цветные металлы*. 2019. № 12. С. 22–29. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.12.03>
4. Bazhin V.Yu., Brichtkin V.N., Sizyakov V.M., Cherkasova M.V. Pyrometallurgical treatment of a nepheline charge using additives of natural and technogenic origin // *Metallurgist*. 2017. Vol. 61. No. 1-2. P. 147–154. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0468-y>
5. Nemchinova N.V., Yakushevich P.A., Yakovleva A.A., Gavrilenko L.V. Experiment for use of Bratsk aluminium plant technogenic waste as a reducing agent during cast iron smelting // *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. Iss. 1-2. P. 150–155. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0637-7>
6. Шепелев И.И., Головных Н.В., Сахачев А.Ю., Жижавев А.М., Котлягин А.Г. Улучшение качества спека известняково-нефелиновой шихты путем ввода в нее гипсоангидритового техногенного сырья // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018. Т. 22. № 5. С. 225–239. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-225-239>
7. Mann V., Pingin V., Zherdev A., Bogdanov Y., Pavlov S., Somov V. SPL recycling and re-processing // *Light Metals The Minerals, Metals & Materials Series* / eds. A. Ratvik. Cham: Springer, 2017. P. 571–578. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_71
8. Nemchinova N.V., Chernykh V.E., Tyutrin A.A., Patrushov A.E. Extraction of zinc and iron from electrosmelting dust // *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46. No. 5. P. 368–372. <https://doi.org/10.3103/S0967091216050090>
9. Шумилова Л.В. Экспериментальные исследования в перколяторах по извлечению золота из забалансовых руд и техногенных отходов // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2007. № 4. С. 232–242.
10. Волюнкина Е.П. Анализ состояния и проблем переработки техногенных отходов в России // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2017. № 2. С. 43–49.
11. Чантурия В.А., Макаров В.Н., Макаров Д.В. Экологические и технологические проблемы переработки техногенного сульфидсодержащего сырья: монография. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2005. 218 с.
12. Сидоренко Г.Г., Никитина Ж.С. Методы исследования технологии комплексной переработки руд. М.: Изд-во ИПКОН РАН, 1991. 98 с.
13. Gorlova O.E., Zhilina V.A. Development of deep and comprehensive processing processes of technogenic mineral raw materials in a view of sustainable development strategy // *XXIX International Mineral Processing Congress 2018 (Moscow, 17–21 September 2018)*. Moscow, 2018. P. 3279–3287.
14. Брагина В.И., Коннова Н.И. О комплексности переработки золотосодержащих руд // *Современные технологии освоения минеральных ресурсов: сб. науч. тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. (г. Красноярск, 16 сентября 2011 г.)*. Красноярск, 2011. С. 43–46.
15. Фоменко А.И. Технологии переработки техногенного сырья: монография. М.: «Инфа-Инженерия», 2018. 137 с.
16. Пат. № 2483807, Российская Федерация, В03В 9/00. Способ извлечения золота и устройство для обогащения золотосодержащего сырья / К.П. Курганов; заявитель и патентообладатель К.П. Курганов. Заявл. 02.08.2011; опубл. 10.06.2013. Бюл. № 16.
17. Курганов К.П. Гравитационная технология для оценки и комплексной разработки техногенных образований благородных металлов // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2016. № 1. С. 49–56.
18. Гуляева Р.И., Шин С.Н., Чумарев В.М., Селиванов Е.Н. Технология комплексной переработки пиритных огарков // *Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований (Техноген – 2017): труды Конгресса с международным участием и Конференции молодых ученых V форума (г. Екатеринбург, 5–9 июня 2017 г.)*. Екатеринбург, 2017. С. 272–274.
19. Борисков Ф.Ф., Филиппова Н.А., Макаранец Л.О. Перспективы переработки пиритных хвостов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2003. № 9. С. 190–195.
20. Пат. № 2149706, Российская Федерация, В03Д 1/00. Способ обогащения минерального сырья / А.А. Быков, Г.И. Аржанников; заявитель и патентообла-

тель: А.А. Быков, Г.И. Аржанников. Заявл. 01.12.1998; опубл. 27.05.2000. Бюл. № 15.

21. Прохоров К.В., Александрова Т.Н. Исследование переработки техногенного тонкодисперсного сырья с использованием магнитного обогащения // Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения – 2012): матер. междунар. совещания (г. Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г.). Петрозаводск, 2012. С. 346–348.

22. Фазылов Р.Р., Лебедев Б.Н. Применение электрической сепарации при комплексной переработке пиритных огарков // *Металлургия, обогащение и металловедение*. 1975. № 5. С. 32–36.

23. Бочаров В.А., Игнаткина В.А., Чантурия Е.Л., Юшина Т.И., Хачатрян Л.С., Дунаева В.Н. О выборе возможных способов комплексного использования техногенных пиритных хвостов в связи с их переработкой // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015. № 10. С. 92–99.

24. Добросельская Н.П., Новикова Е.А., Певзнер Г.Р. Комплексная переработка пиритных огарков на новых японских заводах «Осаяма» и «Амагасаки» // *Цветная металлургия*. 1972. № 22. С. 34–37.

25. Пат. № 2659505, Российская Федерация, С22В 1/06. Способ переработки пиритных огарков / В.К. Ларин, Л.Ш. Бикбаев, Е.Г. Бибик; заявитель и патентообладатель В.К. Ларин, Л.Ш. Бикбаев, Е.Г. Бибик. Заявл. 06.09.2017; опубл. 02.07.2018. Бюл. № 19.

26. Пат. № 2716440, Российская Федерация, С22В 3/10. Способ переработки пиритных огарков / К.Е. Галеру, А.В. Алексеев, С.Н. Першин, Г.Е. Курдюмов, А.В. Граховский, В.Е. Тюренкова, Е.Г. Поездник; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество «Северсталь» (ПАО «Северсталь»). Заявл. 31.10.2019; опубл. 12.03.2020. Бюл. № 8.

27. Пат. № 2623948, Российская Федерация, С22В 11/00. Способ комплексной переработки пиритных огарков / М.А. Щелконогов, Л.Г. Литвиненко, В.Г. Литвиненко, А.А. Морозов; заявитель и патентообладатель Публичное акционерное общество «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ПАО «ППГХО»). Заявл. 06.04.2016; опубл. 29.06.2017. Бюл. № 19.

28. 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. Вып. 1. С. 193–210. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2020-1-1-193-210>

29. Dementiev V., Khmel'nitskaya O., Mullov V., Komlev M., Lanchakova O. The development plant testing of valuable metals recovery technology from pyrite cinders // XXVI International mineral processing congress, International Mineral Processing Congress 2012: Innovative Processing for sustainable growth (New Deli, 24–28 September 2012). New Deli, 2012. P. 2412–2420.

30. Василькова Н.А., Жучков И.А., Игнатьева К.Д., Лодейщиков В.В., Панченко А.Ф., Стахеев И.С. [и др.]. Техника и технология извлечения золота из руд за

рубежом. М.: Металлургия, 1973. 288 с.

31. Пат. № 2034062, Российская Федерация, С22В 11/00. Способ извлечения благородных металлов из пиритных огарков / И.П. Смирнов, А.В. Водолазов, Г.Ф. Иванов, Г.И. Москвичева, Ю.А. Меньшиков, М.А. Жиличев [и др.]; заявитель и патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт химической технологии. Заявл. 29.04.1992; опубл. 30.04.1995. Бюл. № 11.

32. Лодейщиков В.В. Золотоизвлекающие фабрики мира. Аналитический обзор. Т. 2. Иркутск: АО «Иргиредмет», 2005. 447 с.

33. Меретуков М.А., Орлов А.М. Металлургия благородных металлов. Зарубежный опыт. М.: Металлургия, 1991. 416 с.

34. Зубков А.А., Шуленина З.М. Переработка пиритных огарков // Конгресс обогатителей стран СНГ: материалы конгресса (г. Москва, 19–21 марта 2003 г.). Москва, 2003. Т. 1. С. 95–97.

35. Чугаев Л.В., Корженевская М.М. О выщелачивании золота сернокислотными растворами // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 1972. № 5. С. 57–61.

36. Khmel'nitskaya O.D., Komlev M.Yu., Mullov V.M., Lanchakova O.V., Anayko A.I. A complex technology of pyrite cinder processing // XXIV International mineral processing congress (Beijing, 24–28 September). 2008. Vol. 3. P. 3984–3991.

37. Galtseva O., Bordunov S., Zhiganov A., Plotnikova I. Technology of gold-containing technogenic raw materials processing using the electric explosion method // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 942. P. 30–39. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.942.30>

38. Nam Kwang Soo, Jung Byoung Hi, An Jeon Woong, Ha Tae Jun, Tran Tam, Kim Myong Jun. Use of chloridehypochlorite leachants to recover gold from tailings // *International Journal of Mineral Processing*. 2008. Vol. 86. Iss. 1-4. P. 131–140.

<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2007.12.003>

39. Дементьев В.Е., Войлошников Г.И., Федоров Ю.О. Разработки АО «Иргиредмет» по извлечению ценных компонентов из техногенного сырья // *Известия Тульского государственного университета*. 2020. № 4. С. 418–427.

40. Бывальцев А.В., Шарипов Р.Х., Васильев Е.А., Рудой Г.Н. Разработка рациональной технологии извлечения золота из хвостов Учалинской обогатительной фабрики // *Обогащение руд*. 2019. № 5. С. 46–51. <https://doi.org/10.17580/or2019.05.09>

41. Karagodin S.S., Karagodin V.S., Morozov Yu. P., Zaulzolkov I.V. To the question about prospects (upcycle) of abandoned copper-sulphide pits in the Urals // *Известия Уральского государственного горного университета*. 2018. № 4. С. 114–121. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-114-121>

42. Shadrinova I.V., Gorlova O.E., Orekhova N.N., Zilina V.A. Forming conditions of technogenic gold-bearing objects and technological properties of gold from gold extraction plant tailings // *International journal of Applied Engineering Research*. 2018. Vol. 13. No. 8. P. 6340–6347. [Электронный ресурс]. URL:

43. https://www.ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n8_99.pdf (22.05.2020).
44. Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Gustaytis M.A., Zhmodik S.M. Gold and silver in a system of sulfide tail-

ings. Part 2: Reprecipitation on natural peat // Journal of Geochemical Exploration. 2016. Vol. 165. P. 8–22. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.01.016>

References

1. Dyubanov VG, Leontyev LI. Technogenic waste products of ferrous and nonferrous metallurgy, and environmental issues. *Ekologiya i promyshlennost Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2011;4:32–35. (In Russ.)
2. Burdonov AE, Zelinskaya EV, Gavrilenko LV, Gavrilenko AA. Investigation of substantial composition of alumina-bearing material of aluminium electrolyzers for usage in primary aluminium technology. *Tsvetnye Metally*. 2018;3:32–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.03.05>
3. Nemchinova NV, Tyutrin AA, Barauskas AE. Analysing the chemical composition of man-made materials resultant from the production of primary aluminium in order to find cost-effective recycling techniques. *Tsvetnye Metally*. 2019;12:22–29. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.12.03>
4. Bazhin VY, Brichkin VN, Sizyakov VM, Cherkasova MV. Pyrometallurgical treatment of a nepheline charge using additives of natural and technogenic origin. *Metallurgist*. 2017;61(1-2):147–154. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0468-y>
5. Nemchinova NV, Yakushevich PA, Yakovleva AA, Gavrilenko LV. Experiment for use of Bratsk aluminium plant technogenic waste as a reducing agent during cast iron smelting // *Metallurgist*. 2018;62(1-2):150–155. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0637-7>
6. Shepelev II, Golovnykh NV, Sakhachev AY, Zhyzhaev AM, Kotlyagin AG. Improving limestone-nepheline charge sinter quality by gypsum anhydrate technogenic raw material introduction. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(5):225–239. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-225-239>
7. Mann V, Pingin V, Zherdev A, Bogdanov Y, Pavlov S, Somov V. SPL recycling and re-processing. In: Ratvik A (eds.). *Light Metals. The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer; 2017, p. 571–578. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51541-0_71
8. Nemchinova NV, Chernykh VE, Tyutrin AA, Patrushov AE. Extraction of zinc and iron from electrosmelting dust. *Steel in Translation*. 2016;46(5):368–372. <https://doi.org/10.3103/S0967091216050090>
9. Shuliova LV. Experimental studies in percolators on gold extraction from off-balance ores and industrial waste. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2007;4:232–242. (In Russ.)
10. Volynkina EP. Analysis of the state and problems of processing industrial waste in Russia. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2017;2:43–49. (In Russ.)
11. Chanturia VA, Makarov VN, Makarov DV. *Ecological and technological challenges in processing of technogenic sulphide-bearing raw materials*. Apatity: Kola Scientific Centre RAS; 2005, 218 p. (In Russ.)
12. Sidorenko GG, Nikitina JS. *Research methods of comprehensive ore processing technology*. Moscow: Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON); 1991, 98 p. (In Russ.)
13. Gorlova OE, Shadrinova IV, Zhilina VA. Development of deep and comprehensive processing processes of technogenic mineral raw materials in a view of sustainable development strategy. In: *XXIX International Mineral Processing Congress*. 17–21 September 2018, Moscow. Moscow; 2018, p. 3279–3287.
14. Bragina VI, Konnova NI. On integrated processing of gold-bearing ores. In: *Sovremennyye tekhnologii osvoeniya mineral'nykh resursov: sbornik nauchnykh trudov IX mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii = Modern technologies of mineral resources development: collected scientific articles of IX International scientific and technical conference* 16 September 2011, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk; 2011, p. 43–46. (In Russ.)
15. Fomenko AI. *Recycling technologies for technogenic raw materials*. Moscow: Infa-Inzheneriya; 2018, 137 p. (In Russ.)
16. Kurganov KP. *Gold extraction method and a device for gold-bearing raw materials concentration*. Patent RF, no. 2483807; 2013. (In Russ.)
17. Kurganov KP. Gravitational technology for the assessment and complex development of technogenic formations of precious metals. *Vestnik Rossiiskogo Universiteta Druzhby Narodov. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya = RUDN Journal of Engineering Researches*. 2016;1:49–56.
18. Gulyaeva RI, Shin SN, Chumarev VM, Selivanov EN. Integrated technology for pyrite cinder processing. In: *Fundamental'nyye issledovaniya i prikladnyye razrabotki protsessov pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrabotannykh: trudy Kongressa s mezhdunarodnym uchastiyem i konferentsii molodykh uchenykh V foruma = Fundamental research and applied development of the processes of technogenic formation recycling and disposal: Proceedings of the Congress with International Participation and the Conference of Young Scientists of V Forum*. 5–9 June 2017, Ekaterinburg. Ekaterinburg; 2017, p. 272–274. (In Russ.)
19. Boriskov FF, Filippova NA, Makaranets LO. Development prospects of pyrite tailings. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2003;9:190–195. (In Russ.)
20. Bykov AA, Arzhannikov GI. *Method of mineral raw materials concentration*. Patent Russian Federation, no. 2149706; 2000. (In Russ.)
21. Prochorov KV, Alexandrova TN. Research of technogenic fine-dispersed raw material processing using magnetic concentration. In: *Sovremennyye metody tekhnolog-*

- icheskoj mineralogii v processah kompleksnoj i glubokoj pererabotki mineral'nogo syr'ya (Plaksinskie chteniya – 2012): materialy mezhdunarodnogo soveshchaniya = Modern methods of technological mineralogy in the processes of complex and deep processing of mineral raw materials (Plaksinskie readings - 2012): Materials of the international meeting. 10–14 September 2012, Petrozavodsk. Petrozavodsk; 2012, p. 346–348. (In Russ.)
22. Fazylov RR, Lebedev BN. Using electrical separation in integrated processing of pyrite cinders. *Metallurgiya, obogashcheniye i metallovedeniye*. 1975;5:32–36.
23. Bocharov VA, Ignatkina VA, Chanturiya EL, Yushina TI, Khachatryan LS, Dunaeva VN. On selection of possible methods for integrated use of pyrite tailings after processing. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2015;10:92–99. (In Russ.)
24. Dobroselskaya NP, Novikova EA, Pevzner GR. Pyrite cinder complex processing at new Japanese factories Osayama and Amagasaki. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Universities' Proceedings Non-Ferrous Metallurgy*. 1972;22:34–37. (In Russ.)
25. Larin VK, Bikbaev LSh, Bibik EG. *Processing method of pyrite cinders*. Patent Russian Federation, no 2659505; 2018. (In Russ.)
26. Galery KE, Alekseev AV, Pershin SN, Kurdyumov GE, Grakhovskiy AV, Tyurenkova VE, Poyezdnik GE. *Method for processing pyrite cinders*. Patent Russian Federation, no 2716440; 2020. (In Russ.)
27. Shchelkonogov MA, Litvinenko LG. *Integrated processing method for pyrite cinders*. Patent Russian Federation, no 2623948; 2017. (In Russ.)
28. Gorlova OE, Shadunova IV, Zhilina VA, Chekushina TV. Increasing the ratio of gold recovery from aged tailings of gold-bearing ore processing. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta*. 2020;1:193–210. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2020-1-1-193-210> (In Russ.)
29. Dementiev V, Khmel'nitskaya O, Mullov V, Komlev M, Lanchakova O. The development plant testing of valuable metals recovery technology from pyrite cinders. In: XXVI International Mineral Processing Congress, International Mineral Processing Congress 2012: Innovative processing for sustainable growth. 24–28 September 2012, New Delhi. New Delhi; 2012, p. 2412–2420.
30. Vasilkova NA, Zhuchkov IA, Ignat'eva KD, Lodejshchikov VV, Panchenko AF, Staheev IS, et al. *Methods and technology of gold extraction from ores abroad*. Moscow: Metallurgiya; 1973, 288 p. (In Russ.)
31. Smirnov IP, Vodolazov AV, Ivanov GF, Moskvicheva GI, Men'shikov YuA, Zhilichev MA, et al. *Extraction method of precious metals from pyrite cinders*. Patent Russian Federation, no. 2034062; 1995. (In Russ.)
32. Lodejshchikov VV. *Gold recovery factories of the world. Analytical review*. Vol. 2. Irkutsk: OAO "Irgiredmet"; 2005, 447 p. (In Russ.)
33. Meretukov MA, Orlov AM. *Metallurgy of precious metals. Foreign experience*. Moscow: Metallurgiya; 1991, 416 p. (In Russ.)
34. Zubkov AA, Shulenina ZM. Processing of pyrite cinders. In: Congress obogatiteley stran SNG: Materialy congressa = CIS Congress of the Mineral Processing Engineers: Congress Proceedings. 19–21 March 2003, Moscow. Moscow; 2003, p. 95–97. (In Russ.)
35. Chugaev LV, Korzhenevskaya MM. Leaching of gold with sulfuric acid solutions. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Universities' Proceedings Non-Ferrous*. 1972;5:57–61. (In Russ.)
36. Khmel'nitskaya OD, Komlev MYu, Mullov VM, Lanchakova OV, Anayko AI. A complex technology of pyrite cinder processing. In: XXIV International Mineral Processing Congress. 24–28 September 2008, Beijing. Beijing; 2008, vol. 3, p. 3984–3991.
37. Galtseva O, Bordunov S, Zhiganov A, Plotnikova I. Technology of gold-containing technogenic raw materials processing using the electric explosion method // *Materials Science Forum*. 2019;942:30–39. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.942.30>
38. Nam Kwang Soo, Jung Byoung Hi, An Jeon Woong, Ha Tae Jun, Tran Tam, Kim Myong Jun. Use of chloridehypochlorite leachants to recover gold from tailings. *International Journal of Mineral Processing*. 2008;86(1-4):131–140. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2007.12.003>
39. Dementiev VE, Voiloshnikov GI, Fedorov YuO. JSC Irgiredmet developments on valuable constituents recovery from technogenic raw materials. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta = Izvestiya Tula State University*. 2020;4:418–427. (In Russ.)
40. Byvaltsev AV, Sharipov RKh, Vasiliev EA, Rudoy GN. Development of a rational technology for gold extraction from Uchalinskaya concentration plant tailings. *Obogashcheniye rud = Materials Chemistry*. 2019;5:46–51. (In Russ.)
41. Karagodin SS, Karagodin VS, Morozov Yu P, Zauzol'kov IV. To the question about prospects (upcycle) of abandoned copper-sulphide pits in the Urals. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = News of the Ural State Mining University*. 2018;4:114–121. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2018-4-114-121>
42. Shadrunkova IV, Gorlova OE, Orekhova NN, Zilina VA. Forming conditions of technogenic gold-bearing objects and technological properties of gold from gold extraction plant tailings. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2018;13(8):6340–6347. Available from: https://www.ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n8_99.pdf [Accessed 12nd May 2020].
43. Myagkaya IN, Lazareva EV, Gustaytis MA, Zhmodik SM. Gold and silver in a system of sulfide tailings. Part 2: Reprecipitation on natural peat. *Journal of Geochemical Exploration*. 2016;165:8–22. <https://doi.org/10.1016/j.gexpro.2016.01.016>



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Василькова Анастасия Олеговна,
аспирант,
младший научный сотрудник Лаборатории
гидрометаллургии,
АО «Иргиредмет»,
664011, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия;
✉ e-mail: anastasiya.perepelkina.94@mail.ru

Васильков Николай Владимирович,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: nik.vasilkov.94@bk.ru

Хмельницкая Ольга Давыдовна,
кандидат технических наук,
заведующая Лабораторией гидрометаллургии,
АО «Иргиредмет»,
664011, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия;
e-mail: lab15@irgiredmet.ru

Войлошников Григорий Иванович,
доктор технических наук, профессор,
заместитель генерального директора
по научной работе и инновациям,
АО «Иргиредмет»,
664011, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38, Россия;
e-mail: greg@irgiredmet.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 11.09.2020; одобрена после рецензирования 01.12.2020; принята к публикации 26.02.2021.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anastasiya O. Vasilkova,
Postgraduate Student,
Junior Researcher of the Hydrometallurgy Laboratory,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk 664011, Russia;
✉ e-mail: anastasiya.perepelkina.94@mail.ru

Nikolay V. Vasilkov,
Master's Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: nik.vasilkov.94@bk.ru

Olga D. Khmelnitskaya,
Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Hydrometallurgy Laboratory,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk 664011, Russia;
e-mail: lab15@irgiredmet.ru

Grigoriy I. Voyloshnikov,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Deputy General Director for Research and Innovation,
Irgiredmet JSC,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk 664011, Russia;
e-mail: greg@irgiredmet.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 11.09.2020; approved after reviewing 01.12.2020; accepted for publication 26.02.2021.