

## К утилизации хвостов обогащения руд цветных металлов

В.И. Голик<sup>1, 2</sup>✉, А.В. Титова<sup>3</sup>, Г.И. Титов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Северо-Кавказский государственный технологический университет, г. Владикавказ, Российская Федерация

<sup>2</sup> Московский государственный политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup> Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

✉ v.i.golik@mail.ru

**Резюме:** Одной из проблем цветной металлургии являются повышенные потери металлов в процессе переработки рудного сырья на стадии обогащения. Минерально-сырьевая база цветных металлов России испытывает влияние несовершенства отдельных процессов обогащения на показатели эффективности производства товарного сырья. Техногенные отходы подотраслей цветной металлургии нередко формируют месторождения, соизмеримые с запасами коренных руд. Кроме экономического ущерба от неполного извлечения металлов, хранение отходов горнорудного производства порождает экологические проблемы. Отечественные технологии не обеспечивают безотходности процессов обогащения. Модернизация процессов обогащения осуществляется путем привлечения операций гидрометаллургической переработки, в результате чего изменяются свойства минералов с повышением степени раскрытия и извлечения металлов. Увеличение извлечения металлов возможно путем повышения активности минералов обработкой их поверхностно-активными веществами. Эффективность механохимической активации процессов выщелачивания освещалась на страницах ведущих и иностранных журналов и находит развитие в исследованиях на затронутую тему. Показатели технологий улучшаются при комбинировании традиционных технологий с новыми безотходными гидрометаллургическими технологиями путем введения в технологическую цепь аппаратов-активаторов типа дезинтегратор.

**Ключевые слова:** цветная металлургия, металлы, обогащение, экология, безотходность, энергетическое воздействие, свойства минералов

**Для цитирования:** Голик В.И., Титова А.В., Титов Г.И. К утилизации хвостов обогащения руд цветных металлов. *Горная промышленность*. 2023;(5):96–101. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-96-101>

## On utilization of concentration tailings of non-ferrous metal ores

V.I. Golik<sup>1, 2</sup>✉, A.V. Titova<sup>3</sup>, G.I. Titov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> North Caucasus State Technological University, Vladikavkaz, Russian Federation

<sup>2</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup> V.I. Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ nilegion@mail.ru

**Abstract:** One of the issues of non-ferrous metallurgy is the high losses of metals during concentration as part of complex processing of the ores. The mineral resource base of non-ferrous metals in Russia is affected by the shortcomings of certain concentration processes that have a negative impact on the efficiency of commodity production. Human-generated wastes of non-ferrous metallurgy industries often form reserves that are comparable to the natural deposits of primary ores. In addition to the economic losses from incomplete metal recovery, dumping of mining waste creates environmental problems. Current Russian technologies fail to ensure waste-free concentration processes. Upgrading of the concentration processes is done through introduction of hydro-metallurgical treatment operations, which results in changes of the mineral properties that leads to better ore liberation and enhanced metal recovery. It is also possible to increase the metal recovery by boosting the activity of minerals through their treatment with surfactants. The efficiency of mechanochemical activation of the leaching processes has been discussed in the leading Russian and foreign scientific journals and magazines, and is being further developed in research activities on the subject. The technology performance is improved when traditional technologies are combined with new waste-free hydrometallurgical processes through introduction of disintegrator-type activators into the process flow.

**Keywords:** non-ferrous metallurgy, metals, concentration, environmental problems, waste-free, energy impact, mineral properties

**For citation:** Golik V.I., Titova A.V., Titov G.I. On utilization of concentration tailings of non-ferrous metal ores. *Russian Mining Industry*. 2023;(5):96–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-96-101>

## Введение

Одной из актуальных тем исследования проблем горно-производства является утилизация хвостов переработки добытого из недр рудного сырья. Ее актуальность объясняется тем, что при в целом достаточной обеспеченности отраслей экономики металлами состояние минерально-сырьевой базы цветных металлов вызывает озабоченность. Большая часть исследований посвящена вопросам использования запасов хвостохранилищ [1–2].

Из добытых руд извлекается не более 2/3 металлов, в том числе попутных металлов 10...30%. Поэтому получают развитие новые подходы к созданию малоотходного и безотходного производства на основе сочетания физико-технических и физико-химических геотехнологий.

Отдельные участки хранилищ хвостов обогащения руд содержат практически промышленные концентрации дорогих и дефицитных металлов и представляют собой техногенные месторождения, пригодные для эксплуатации. К ним относятся также хранилища шлаков металлургических заводов и некондиционные руды. Кроме негативного влияния на экосистемы окружающей среды, хранение отходов горнорудного производства ежегодно увеличивает площади отчуждаемых земель на 90 км<sup>2</sup> [3–6].

Одним из направлений снижения выхода хвостов переработки является совершенствование методов рудоподготовки минерального сырья [7–8].

В качестве приоритетного направления упрочнения минерально-сырьевой базы горно-металлургического производства рассматривается утилизация металлосодержащих отходов [9–10].

Расширяется область применения сравнительно новой технологии извлечения металлов выщелачиванием не только для доработки недоступного традиционным технологиям сырья, но и для отработки кондиционного сырья [5; 11; 12]. Для определения параметров новых технологий становится необходимым моделирование процессов разработки рудных месторождений, направленных на повышение полноты использования добытого минерального сырья [13; 14].

В сфере утилизации отходов оптимизируются традиционные процессы переработки и получают развитие новые процессы переработки руд [15].

Повышается значимость исследований новых технологических процессов в решении задач ресурсосбережения [16; 17], а также использовании их результатов в смежных отраслях народного хозяйства [18; 19].

Особенностью современного состояния проблемы является то, что при утилизации образуются вторичные хвосты, утилизировать которые будет ещё труднее [20; 21].

Целью настоящего исследования является детализация процесса гидрометаллургического извлечения металлов из вскрываемых руд до уровня санитарных норм и обеспечения возможности неограниченного применения в смежных отраслях экономики.

Цель достигается решением ряда задач, в том числе: анализ минерально-сырьевой базы цветной металлургии России, методы извлечения металлов и их отходов переработки и детализация процессов комбинирования механической и химической энергии.

Целью исследований данного направления является разработка технологий безотходной утилизации отходов переработки.

## Методология

Целью исследования является детализация концепции рационального использования минеральных ресурсов с использованием прогрессивных технологий разработки месторождений подземным способом.

Обобщаются направления совершенствования процессов переработки металлосодержащего сырья. Отмечается, что традиционные методы переработки не обеспечивают безотходности, и предлагается увеличение диапазона применения операций гидрометаллургической и химической переработки, которые повышают степень извлечения полезных компонентов.

Экспериментально подтверждается возможность извлечения всех металлов до фонового уровня путем обработки их реагентами с использованием особого энергетического состояния в скоростных мельницах-дезинтеграторах.

Определяется круг вопросов, сопряженных с механохимической активацией процессов выщелачивания. В качестве аргумента отмечается тенденция вовлечения запасов техногенных месторождений в эксплуатацию технологиями с выщелачиванием металлов.

Рекомендуется схема извлечения металлов при комбинировании традиционных технологий с новыми гидрометаллургическими технологиями. Анонсируется, что извлечение металлов из омертвленных в отходах добычи и переработки в соответствующих условиях может обеспечить прибыль.

## Результаты исследования

Количество месторождений руд цветных металлов в России представлено в табл. 1.

Из табл.1 видно, что техногенные месторождения становятся объектом эксплуатации наряду с природными. Добычные работы смещаются в труднодоступные регионы с суровым климатом, требующие больших затрат на создание инфраструктуры.

Совершенствование процессов и технологий переработки руд развивается в направлениях, приведенных на рис. 1.

Уменьшению объема отходов способствует модернизация традиционных и разработка новых процессов извлечения металлов: селективной дезинтеграции с использованием энергии газообразной среды, взрыва, электроимпульсной и плазменной обработки; немеханических способов разрушения, например, мощных коротких импульсов с превосходящей электрическую прочность вещества энергией; селективной флотации в процессах аэрационно-окислительной, тепловой и электрохимической обработки.

Однако применяемые методы переработки не обеспечивают безотходности процессов обогащения. Среди направлений совершенствования процессов извлечения металлов наиболее перспективным считается использование операций гидрометаллургической и химической переработки [7].

Комбинирование процессов обогащения позволяет вовлекать металлы из некондиционных руд и техногенного сырья, например, при разработке месторождения Озерное и месторождений «УГМК-Холдинг».

Извлечение металлов до требуемого уровня возможно при выщелачивании в активаторах, например дезинтеграторе, с использованием энергетического состояния и повышенной реакционной способности (рис. 2).

**Таблица 1**  
Сведения о месторождениях цветных металлов

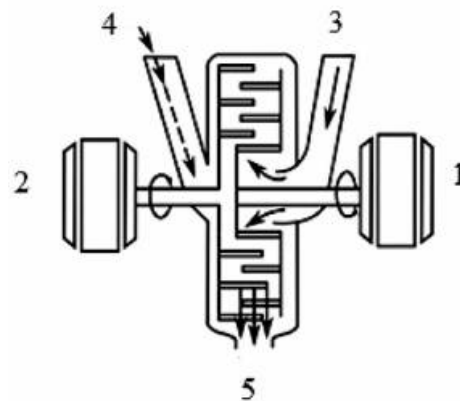
**Table 1**  
Information about non-ferrous metal deposits

География	Металлы	Месторождения		
		Коренные	Техногенные	Россыпные
Алтайский, Забайкальский и Красноярский края, Оренбургская, Архангельская и Кемеровская области, Бурятия, Тыва, Якутия, Башкортостан	Цинк	151	1	–
Красноярский, Алтайский, Приморский и Забайкальский края, Якутия, Бурятия	Свинец	102	–	–
Красноярский край, Мурманская и Оренбургская области	Никель	59	3	–
Красноярский и Забайкальский края, Мурманская, Оренбургская, Челябинская, Свердловская области, Башкортостан, Тыва	Медь	171	6	–
Коми, Забайкальский край, Челябинская, Амурская, Тамбовская и Мурманская области	Титан	19	1	16
Приморский край, Забайкальский край, Бурятия, Кабардино-Балкария	Вольфрам	52	1	40
Хабаровский край, Якутия, Приморский край	Олово	123	–	147
Забайкальский край, Хакасия, Бурятия, Кабардино-Балкария	Молибден	34	–	–
Архангельская, Ленинградская, Белгородская, Свердловская и Челябинская области, Республика Коми	Бокситы, нефелин	57 17	–	–



**Рис. 1**  
Направления совершенствования процессов и технологий обогащения руд

**Fig. 1**  
Directions for improving ore dressing processes and technologies



**Рис. 2**  
Выщелачивание хвостов обогащения в дезинтеграторе:  
1, 2 – электродвигатели;  
3 – хвосты обогащения;  
4 – раствор реагентов;  
5 – производционный раствор и вторичные хвосты

**Fig. 2**  
Leaching of concentration tailings in disintegrator:  
1, 2 – electric motors;  
3 – concentration tailings;  
4 – reactant solution;  
5 – production solution and secondary tailings

**Таблица 2**  
Количество металлов в стоках

**Table 2**  
The amount of metals in the drains

Шахтная вода	pH	Содержание, мг/л						
		Натрий	Кальций	Магний	Медь	Цинк	Свинец	Железо
Слив сгустителя								
Медного	9,6	435	220	30	18	1,5	1,1	0,17
Свинцового	9,3	280	92	11	8	1,4	3,2	0,30
Цинкового	10,4	156	140	7	2	2,7	1,1	0,30
Хвосты	9,9	100	104	8	4	2,0	0,6	0,70
Слив хранилища	8,5	150	100	15	0,5	0,8	0,1	0,30
Слив сгустителя концентрата								
Медного	10,2	–	32	15	47	3,4	0,1	–
Свинцового	8,8	14	74	21	9	8,0	1,2	0,34
Цинкового	–	–	173	196	1	9,5	3,3	0,8
Баритового	8,7	31	82	55	0,5	1,2	0,4	0,25
Хвосты	9,7	24	84	75	5,6	6,1	1,5	0,7
Слив хранилища	9,0	30	80	70	0,7	0,5	0,3	0,2

Таблица 3  
Разработка техногенных месторождений выщелачиванием

Table 3  
Development of man-made deposits by leaching

Металл	Месторождение	Технология
Медь	Техногенные месторождения	Кучное выщелачивание
	Гумешевское	Подземное выщелачивание
Никель-кобальт	Аллареченское	Кучное выщелачивание
	Хвостохранилище №1	
	Озеро Барьерное	
Цинк	Шлакоотвал	Кучное выщелачивание
Олово	Техногенные месторождения	Кучное выщелачивание
Вольфрам	Барун-Нарынское	Кучное выщелачивание
	Спокойнинское	
Молибден попутно с ураном	Стрельцовское	Подземное выщелачивание
		Кучное выщелачивание
Титан	Кручининское	Скважинное выщелачивание



Рис. 3  
Схема комбинированного обогащения руд цветных металлов

Fig. 3  
Schematic diagram of combined concentration of non-ferrous metal ores

### Обсуждение

Содержание растворенных в сливах обогатительных фабрик металлов представлено в табл. 2.

Вовлечение запасов техногенных месторождений в эксплуатацию технологиями с выщелачиванием металлов показано в табл. 3 [10].

Учитывая продолжительность процессов выщелачивания и недостаточность опыта отработки балансовых руд, новые гидрометаллургические технологии комбинируют с традиционными технологиями (рис. 3).

Извлечение дополнительного количества металлов из отходов добычи и переработки руд цветных металлов в соответствующих условиях может быть рентабельным. Эффективность ресурсосберегающей технологии повышается с учетом уменьшения ущерба, причиняемого окружающей среде хранящимися отходами.

Использование новых безотходных технологий является действенным шагом по пути упрочнения минеральной безопасности России.

### Выводы

Опыт извлечения металлов с использованием нетрадиционных технологий позволяет заключить, что выщелачивание технологически вскрываемых металлосодержащих руд и хвостов их переработки в дезинтеграторе эффективнее традиционных способов переработки и может применяться в промышленных масштабах в комбинации с методами обогащения.

Освоение технологии с механохимической активацией процессов выщелачивания нуждается в поддержке путем решения сопутствующих проблем.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**Список литературы**

1. Голик В.И., Полухин О.Н., Петин А.Н., Комащенко В.И. Экологические проблемы разработки рудных месторождений КМА // Горный журнал. 2013. №4. С. 91-94. when using activated mill tailings in underground mining. *Metallurgist*. 2023;67:398–408. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01526-z>
2. Дабиев Д.Ф. Оценка развития горных регионов России. *Горная промышленность*. 2022;(2):81–83. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-2-81-83>
3. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Комащенко В.И., Разоренов Ю.И. Экологические аспекты хранения хвостов обогащения руд в горном регионе // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. №6. С. 35-39.4. Валиев Н.Г., Пропп В.Д., Вандышев А.М. Кафедре горного дела УГТУ – 100 лет. Известия высших учебных заведений. *Горный журнал*. 2020;(8):130–143. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-130-143>
5. Li G., Zhou Q., Zhu Z., Luo J., Rao M., Peng Z., Jiang T. Selective leaching of nickel and cobalt from limonitic laterite using phosphoric acid: An alternative for value-added processing of laterite. *Journal of Cleaner Production*. 2018;189:620–626. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.083>
6. Душин А.В., Валиев Н.Г., Лагунова Ю.А., Шорин А.Г. Уральский горный и Московский горный: взаимодействие вузов. *Горный журнал*. 2018;(4):4–10. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.04.01>
7. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С., Тимохин А.В. Совершенствование методов рудоподготовки минерального сырья при освоении сложноструктурных месторождений. *Горная промышленность*. 2022;(1S):63–70. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1S-63-70>
8. Yin S., Shao Y., Wu A., Wang H., Liu X., Wang Y. A systematic review of paste technology in metal mines for cleaner production in China. *Journal of Cleaner Production*. 2020;247:119590. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119590>
9. Рыбак Я., Горбатюк С.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Хайрутдинов А.М., Тюляева Ю.С., Макаров П.С. Утилизация техногенных отходов горно-металлургических комплексов – способ расширения минерально-сырьевой базы предприятия. *Металлург*. 2020;(9):8–16.
10. Qi C., Fourie A. Cemented paste backfill for mineral tailings management: Re-view and future perspectives. *Minerals Engineering*. 2019;144:106025. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106025>
11. Балихин А.В. Минерально-сырьевая база урана: современное состояние и перспективы развития. Обзор. *Комплексное использование минерального сырья*. 2019;(1):36–50. <https://doi.org/10.31643/2019/6445.05>
12. Валиев Х.Х., Бугубаева А.У., Амандыкова А.Б., Булаев А.Г. Выщелачивание урана и молибдена из руды месторождения «Восток». Известия Тульского государственного университета. *Науки о Земле*. 2019;(4):92–99.
13. Голик В.И., Титова А.В. Моделирование показателей разработки рудных месторождений Садона. *Горная промышленность*. 2022;(4):82–87. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-4-82-87>
14. Подрезов Д.Р. Задачи совершенствования управления и повышения эффективности функционирования технологических блоков рудника подземного скважинного выщелачивания урана. *Горные науки и технологии*. 2020;5(2):131–153. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-131-153>
15. Секисов А.Г., Лавров А.Ю., Рассказова А.В. *Фотохимические и электрохимические процессы в геотехнологии*. Чита: Забайкальский государственный университет; 2019. 306 с.
16. Rakishev B., Shampikova A., Kenzhetaev Z., Mataev M., Altaybayev B. Research into leaching of uranium from core samples in tubes using surfactants. *Mining of Mineral Deposits*. 2020;14(4):97–104. <https://doi.org/10.33271/mining14.04.097>
17. Шарипзянова Г.К., Еремеева З.В., Саенко А.А. Исследование структуры и свойств механоактивированного титаната самария. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2022;14(1):134–141. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-1-134-141>
18. Яицкая Н.А., Бригида В.С. Геоинформационные технологии при решении трехмерных геоэкологических задач: пространственная интерполяция данных. *Геология и геофизика Юга России*. 2022;12(1):162–173. <https://doi.org/10.46698/VNC.2022.86.27.012>
19. Drobe M., Haubrich F., Gajardo M., Marbler H. Processing tests, adjusted cost models and the economies of reprocessing copper 623 mine tailings in Chile. *Metals*. 2021;11(1):103. <https://doi.org/10.3390/met11010103>

**References**

1. Golik V.I., Polukhin O.N., Petin A.N., Komashchenko V.I. Ecological problems of development of KMA ore deposits // Mining Journal. 2013. No.4. pp. 91-94.
2. Dabiev D.F. Assessment of the development of the mountain regions of Russia. *Russian Mining Industry*. 2022;(2):81–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-2-81-83>
3. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Komashchenko V.I., Razorenov Yu.I. Ecological aspects of ore tailings storage in the mining region // Ecology and industry of Russia. 2018. Vol. 22. No.6. pp. 35-39.4. Valiev N.G., Propp V.D., Vandyshev A.M. The 100th anniversary of the department of mining engineering of URSMU. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2020;(8):130–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-8-130-143>
5. Li G., Zhou Q., Zhu Z., Luo J., Rao M., Peng Z., Jiang T. Selective leaching of nickel and cobalt from limonitic laterite using phosphoric acid: An alternative for value-added processing of laterite. *Journal of Cleaner Production*. 2018;189:620–626. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.083>
6. Dushin A.V., Valiev N.G., Lagunova Yu.A., Shorin A.G. Ural Mining University and Moscow Mining University: interaction of higher education institutions. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(4):4–10. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.04.01>

7. Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S., Timokhin A.V. Improvement of Mineral Processing Methods in Mining Structurally-Complex Deposits. *Russian Mining Industry*. 2022;(1 Suppl.):63–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/16099192-2022-1S-63-70>
8. Yin S., Shao Y., Wu A., Wang H., Liu X., Wang Y. A systematic review of paste technology in metal mines for cleaner production in China. *Journal of Cleaner Production*. 2020;247:119590. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119590>
9. Rybak Ya., Gorbatyuk S.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Khairutdinov A.M., Tyulyaeva Yu.S., Makarov P.S. Utilization of technogenic wastes from mining and metallurgical complexes – a way to expand mineral resource base of enterprise. *Metallurg*. 2020;(9):8–16. (In Russ.)
10. Qi C., Fourie A. Cemented paste backfill for mineral tailings management: Re-view and future perspectives. *Minerals Engineering*. 2019;144:106025. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106025>
11. Balikhin A.V. Uranium mineral-resources: the current state and perspectives for development. Review. *Complex Use of Mineral Resources*. 2019;(1):36–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.31643/2019/6445.05>
12. Valiyev Kh.Kh., Bugubayeva A.U., Amandykova A.B., Bulaev A.G. Uranium and molybdenum leaching from the ore of “Vostok” deposit. *Izvestiya Tulkogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2019;(4):92–99. (In Russ.)
13. Golik V.I., Titova A.V. Modelling of mining performance indicators for the Sadon ore deposits. *Russian Mining Industry*. 2022;(4):82–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-4-82-87>
14. Podrezov D.R. Issues of Improving Control and Increasing Efficiency of Production Blocks at an ISL Uranium Mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(2):131–153. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-131-153>
15. Sekisov A.G., Lavrov A.Yu., Rasskazova A.V. Photochemical and electrochemical processes in geotechnology. Chita: Transbaikal State University; 2019. 306 p. (In Russ.)
16. Rakishiev B., Shampikova A., Kenzhetaev Z., Mataev M., Altaybayev B. Research into leaching of uranium from core samples in tubes using surfactants. *Mining of Mineral Deposits*. 2020;14(4):97–104. <https://doi.org/10.33271/mining14.04.097>
17. Sharipzyanova G.K., Ereemeeva Zh.V., Sayenko A.A. Structure and properties of mechanoactivated samarium titanate powder. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022;14(1):134–141. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2022-14-1-134-141>
18. Yaitskaya N.A., Brigida V.S. Geoinformation technologies in solving three-dimensional geoeological problems. Spatial data interpolation. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. 2022;12(1):162–173. (In Russ.) <https://doi.org/10.46698/VNC.2022.86.27.012>
19. Drobe M., Haubrich F., Gajardo M., Marbler H. Processing tests, adjusted cost models and the economies of reprocessing copper 623 mine tailings in Chile. *Metals*. 2021;11(1):103. <https://doi.org/10.3390/met11010103>

#### Информация об авторах

**Голлик Владимир Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры горного дела, Северо-Кавказский государственный технологический университет, г. Владикавказ, Российская Федерация; профессор кафедры металлургии, Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>; e-mail: v.i.golik@mail.ru

**Титова Ася Владимировна** – доктор технических наук, заместитель директора по развитию, Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

**Титов Грант Игоревич** – научный сотрудник, Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

#### Information about the authors

**Vladimir I. Golik** – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mining, North Caucasus State Technological University, Vladikavkaz, Russian Federation; Professor of the Department of Metallurgy of Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>, e-mail: v.i.golik@mail.ru

**Asya V. Titova** – Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director for Development, V.I. Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: vikt\_s@mail.ru

**Grant I. Titova** – Research Associate, Deputy Director for Development, V.I. Vernadsky State Geological Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.09.2023

Поступила после рецензирования: 04.10.2023

Принята к публикации: 06.10.2023

#### Article info

Received: 11.09.2023

Revised: 04.10.2023

Accepted: 06.10.2023