

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ЛЕЖАЛЫХ ОЛОВО-ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ХВОСТОВ ШЕРЛОВОГОРСКОГО ГОКА

Л.В. Шумилова¹, А.Н. Хатькова¹, К.К. Размахнин¹, М.Ф. Простакишин¹

¹ Забайкальский государственный университет, Чита, Россия, e-mail: shumilovalv@mail.ru

Аннотация: Необходимость вовлечения в отработку техногенных объектов, содержащих редкие металлы, является актуальной научной задачей. Технологически и экономически эффективнее и целесообразнее осуществлять переработку отходов предприятий горного кластера, как горнодобывающих, так и горно-перерабатывающих, по единой технологической схеме. Цель исследования – разработать альтернативные варианты пирометаллургических и гидрометаллургических технологий переработки отходов добычи и переработки олово-полиметаллических руд с целью извлечения редких и попутно цветных металлов. Объект исследования – хвосты гравитационно-флотационного обогащения олово-полиметаллических руд Шерловогорского месторождения и геотехногенное сырье отвалов карьера Сопка Большая (Забайкальский край). Изучен вещественный состав лежалых хвостов гравитационно-флотационного способа обогащения Шерловогорской обогатительной фабрики и техногенного сырья отвалов карьера Сопка Большая. Разработано три альтернативных варианта технологий переработки отходов предприятий горного кластера с целью извлечения редких и цветных металлов: пирометаллургическая технология; пиро-гидрометаллургическая технология в периодическом режиме выщелачивания; гидрометаллургическая технология, состоящая из двух этапов (базовая флотационно-гидрометаллургическая технология – этап I, базовая гидрометаллургическая технология с поэтапным извлечением металлов – этап II). Извлечение редких элементов Вi, Cd, Sc, In, Be, Li, Nb осуществляется по поэтапным локальным технологиям. Удаление мышьяка достигается применением двухступенчатого обжига: окислительно-сульфидирующий обжиг (1-я ступень), протекающий при температуре 500–550 °С при недостатке кислорода, окислительный обжиг (2-я ступень) – при 600–650 °С при избытке кислорода с расходом 0,25–0,3 л/мин. Разработанная комбинированная технология позволит существенно снизить экологическую опасность отходов деятельности Шерловогорского ГОКа.

Ключевые слова: Шерловогорский ГОК, хвостохранилище, отвалы карьера Сопка Большая, редкие и цветные металлы, геотехногенное месторождение, запасы, альтернативные технологии, пирометаллургическая технология, пиро-гидрометаллургическая технология, гидрометаллургическая технология.

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

Для цитирования: Шумилова Л. В., Хатькова А. Н., Размахнин К. К., Простакишин М. Ф. Разработка технологии переработки лежалых олово-полиметаллических хвостов Шерловогорского ГОКа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12. – С. 152–168. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_152.

Processing technology for old tin-bearing polymetallic tailings at Sherlovaya Gora GOK

L.V. Shumilova¹, A.N. Khatkova¹, K.K. Razmakhnin¹, M.F. Prostackishin¹

¹ Transbaikal State University, Chita, Russia, e-mail: shumilovalv@mail.ru

Abstract: The necessity of processing manmade mineral-bearing objects containing rare metals is a present-day scientific challenge. It is more efficient and advisable both economically and technologically to carry out waste processing within a cluster of mining and processing plants, and using a uniform flow chart. The aim of this study is to develop alternative variants of pyrometallurgical and hydrometallurgical processing technologies for tin-bearing polymetallic ore mining and processing waste with a view to extracting rare and associate nonferrous metals. The study object is the gravity-and-flotation tailings of tin-bearing polymetallic ore of Sherlovaya Gora deposit, and the manmade material dumped at Bolshaya Sopka open pit in Transbaikalia. The material constitutions of the old gravity-and-flotation tailings at Sherlovaya Gora concentration factory and the manmade material in the dumps at Bolshaya Sopka open pit are examined. Three alternative variants are developed for processing waste of this mining cluster with a view to extracting rare and nonferrous metals: pyro-hydrometallurgical technology with periodic leaching; two-stage hydrometallurgical technology (stage I—base flotation and hydrometallurgy; stage II—base hydrometallurgical technology with stepped recovery of metals). Recovery of rare elements Bi, Cd, Sc, In, Be, Li and Nb is implemented using local technologies at each step. Removal of arsenic involves two-step roasting: sulfidation roasting (step 1) at the temperature of 500–550 °C at the lack of oxygen and oxidative roasting (step 2) at 600–650 °C and at excessive oxygen flow rate of 0.25–0.3 l/min. The developed mixed-type technology can greatly reduce the environmental hazard of production waste at Sherlovaya Gora GOK.

Key words: Sherlovaya Gora GOK, tailings storage, Bolshaya Sopka waste dumps, rare and nonferrous metals, manmade mineral deposit, reserves, alternative technologies, pyrometallurgical technology, pyro-hydrometallurgical technology, hydrometallurgical technology.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 22-17-00040 Development and Scientific Substantiation of Eco-Friendly Wasteless Processing Technologies for Natural and Manmade Raw Materials, 2022–2023.

For citation: Shumilova L. V., Khatkova A. N., Razmakhnin K. K., Prostackishin M. F. Processing technology for old tin-bearing polymetallic tailings at Sherlovaya Gora GOK. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12):152-168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_12_0_152.

Введение

Наша страна является одной из крупнейших сырьевых держав мира. Промышленный комплекс России по добыче полезных ископаемых, в том числе стратегической продукции, определяет не только технический прогресс и потен-

циал страны, но и его обороноспособность, экономическую независимость.

В XXI в. требуются нестандартные подходы и технологии, позволяющие расширить минерально-сырьевую базу. Поэтому в горнодобывающей отрасли России наметился ряд новых тенденций

развития (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315-р). В рамках реализации перечня поручений Президента Российской Федерации по итогам заседания Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам, состоявшегося 18 июля 2022 г., разработана Концепция № Пр-1553 от 1 сентября 2022 г. и дорожная карта технологического развития на период до 2030 г. Одно из важных направлений — обеспечение сырьевого суверенитета по некоторым видам стратегических видов сырья, в том числе редких и редкоземельных металлов (РРЗМ).

Важная роль в инновационном пути развития нашей страны отводится минерально-сырьевому комплексу Дальнего Востока [1, с. 18; 2, с. 183], занимающему 41% территории России с большой концентрацией месторождений полезных ископаемых и техногенного сырья. В Российской Федерации, согласно данным Государственного реестра РФ, из 5060,2 млн т отходов производства и потребления на сектор горного кластера приходится 92% (4653,0 млн т) [www.gks.ru — website of the Federal state statistics service of Russia] (рис. 1), из которых 622 млн т (12,29%) — это от-

ходы Дальневосточного ФО [1, с. 21; 2, с. 190; 3; 4; 5, р. 15].

РРЗМ — это перспективные материалы для развития «критических технологий» вооружения и военной техники (см. рис. 2), супермагниты, компьютерные чипы возобновляемых источников энергии, приборостроения, атомной техники, химической промышленности, металлургии, современных средства связи, ядерной энергетики, авиастроения, производства микроэлектроники, электротранспорта, радиоэлектроники, компьютеров и смартфонов, аккумуляторов и так далее.

Например, потребление редкоземельных элементов для возобновляемых источников энергии (солнечная фотоэлектрическая энергия и энергия ветра) составляет 171 кг на 1 МВт мощности.

Также можно привести примеры продукции Вооруженных сил США, в которой используются редкоземельные металлы — это радиолокационные ловушки Miniature Air-Launched Decoy, ракеты класса «воздух-земля» Joint Air-to-Ground Missile; спутники-перехватчики Exoatmospheric Kill Vehicle, системы наземного базирования для перехвата баллистических ракет GMD Missiles, разведывательные и ударные беспилотные

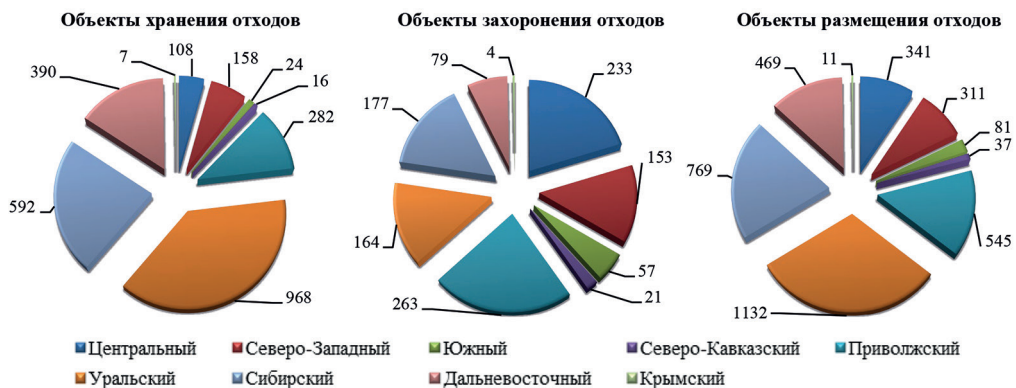


Рис. 1. Отходы производства и потребления по федеральным округам РФ, включенные в Государственный реестр

Fig. 1. Production and consumption waste by federal districts of the Russian Federation included in State Register

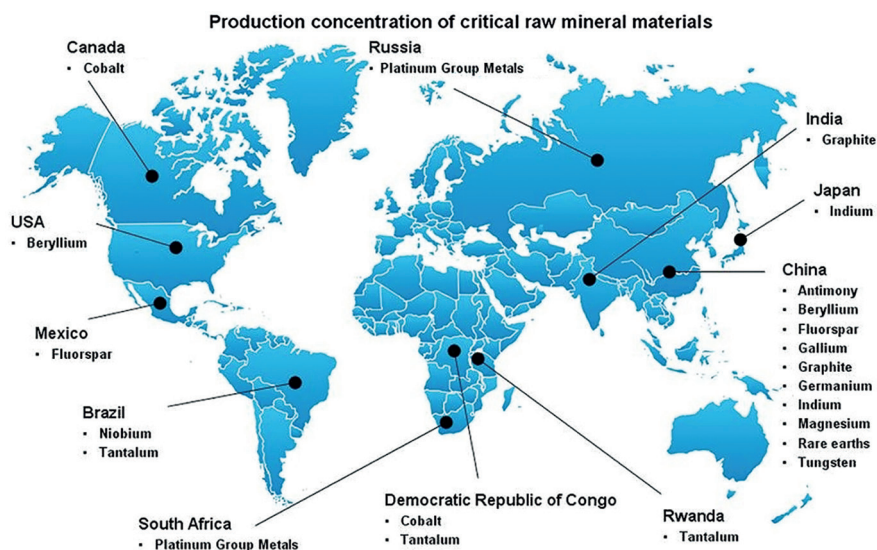


Рис. 2. Редкоземельные металлы, используемые в вооружениях и военной технике стран мира
 Fig. 2. Rare earth metals used in armaments and military equipment of the countries of the world

летательные аппараты MQ-1 Predator, тактические истребители четвертого поколения F-15, легкие истребители четвертого поколения F-16, истребители пятого поколения F-22 Raptor и F-35 Joint Strike Fighter, сверхдальние стратегиче-

ские бомбардировщики-ракетоносители B-52, корабельные пусковые установки Nulka МК 53 Decoy и др. [24].

Потребность в РРЗМ инженерии горного машиностроения очень велика, поскольку в горнодобывающей отрасли

Таблица 1

Запасы редкоземельных элементов по странам / Редкоземельные металлы по странам, 2023

Reserves of rare earth elements by country / Rare Earth metals by country, 2023

Страна	Запасы, млн т	Добыча на рудниках в 2021 г., т	Добыча на рудниках в 2022 г., т
Китай	44	168,000	210,000
Вьетнам	22	400	4,300
Бразилия	21	500	80
Россия	21	2,600	2,600
Индия	6,9	2,900	2,900
Австралия	4,2	24,000	18,000
Гренландия	1,5		
Канада	0,83		
Таиланд		8,200	7,100
Мадагаскар		6,800	960
Бурунди		200	

зависимость от иностранного оборудования достигает 90%.

Поэтому уровень производства РРЗМ становится индикатором — критерием научно-технического суверенитета [6; 7, с. 40—42]. Россия занимает второе место в мире после Китая по запасам редкоземельных металлов, однако добывается всего около 1%.

В табл. 1 представлена информация по запасам редкоземельных элементов по странам, согласно данным Геологической службы США, сводки по минеральным ресурсам, январь 2023 г. [<https://worldpopulationreview.com/country-rankings/rare-earth-reserves-by-country>; <https://pubs.er.usgs.gov/>].

Следует констатировать, что в 2022 г. вынужденный импорт РРЗМ составлял от 80 до 100%. Однако правительством России, в соответствии с дорожной картой, планируется к 2030 г., кроме удовлетворения потребностей внутреннего рынка, начать реализовывать продукцию РРЗМ на экспорт. Это является масштабной научно-производственной задачей, требующей вовлечения всех минерально-сырьевых источников РРЗМ, как природных, так и техногенных.

Актуальность исследований заключается в необходимости вовлечения в отработку техногенных объектов, содержащих РРЗМ [8, с. 420; 9, с. 45—55]. Технологически и экономически эффективно осуществлять переработку не только лежалых хвостов ГОКов, но и скопившихся больших объемов забалансовых некондиционных руд отвалов.

Цель исследования — разработать альтернативные варианты пирометаллургических и гидрометаллургических технологий переработки отходов добычи и переработки олово-полиметаллических руд с целью извлечения редких и попутно цветных металлов.

Объект исследования — хвосты гравитационно-флотационного обогащения

олово-полиметаллических руд Шерловогорского месторождения и геотехногенное сырье отвалов карьера Сопка Большая (Забайкальский край).

Задачи исследования:

- изучить вещественный состав лежалых хвостов гравитационно-флотационного способа обогащения Шерловогорской обогатительной фабрики и техногенного сырья отвалов карьера Сопка Большая;
- разработать альтернативные варианты пирометаллургических и гидрометаллургических технологий переработки отходов добычи (забалансовые некондиционные руды карьера Сопка Большая) и переработки олово-полиметаллических руд (отходы Шерловогорского хвостохранилища) с целью извлечения редких и попутно цветных металлов.

Методы исследований

Минералогический анализ лежалых хвостов обогащения, ситовой, современный комплекс физических, химических и физико-химических методов с использованием современного инструментария: оптической и электронной микроскопии; растровый электронный микроскоп LEO EVO 40HV с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350, спектрохимический и эмиссионный спектральный анализ; рентгенофлуоресцентный анализ; масс-спектрометрический с ионизацией в индуктивно связанной плазме, атомно-абсорбционный методы, методы математической статистики.

Результаты исследований и обсуждение результатов

Шерловогорское олово-полиметаллическое месторождение в Забайкалье успешно обрабатывалось более полувека (1932—1993 гг.) [10, с. 132; 11, с. 159—162; 12; 13, с. 10; 14—19]. В данной статье рассмотрена возможность извлечения главных и сопутствующих химических

Таблица 2

Элементный состав, содержание и запасы лежалых хвостов Шерловогорского ГОКа
Elemental composition, content and reserves of stale tails of the Sherlovogorsky GOK

Элемент (компонент)	Содержание элемента	Запасы, т
Главный компонент (цветной металл)		
Sn	0,26%	10 200
Pb	0,410%	45 800
Zn	0,058%	72 200
W	0,001%	1800
Попутный компонент (благородный металл)		
Ag	7,8 г/т	137,4
Примесный компонент (редкий металл)		
Bi	22,5 г/т	396,4
Cd	10,9 г/т	192,1
Sc	118 г/т	2079
In	3,8 г/т	67,0
Be	10,7 г/т	188,6
Li	40 г/т	704,8
Nb	32 г/т	564,1
Ta	3,0 г/т	52,9
Масса техногенного сырья, т		17 618 000

элементов при совместной переработке лежалых хвостов Шерловогорского ГОКа (ШГОК) и геотехногенного сырья отвалов карьера Сопка Большая.

Элементный состав, содержание и запасы лежалых хвостов Шерловогорского ГОКа представлены в табл. 2.

Анализ данных, представленных в табл. 2, однозначно свидетельствует о том, что переработка лежалых хвостов обогатительной фабрики Шерловогорского ГОКа позволит при разработке достаточно эффективной технологии получить количество основных компонентов, выражающееся в тысячах тонн. Особый интерес вызывает факт более высокого, чем в исходной руде, содержания всех примесных элементов, кроме кадмия, который извлекался вместе со сфалеритом.

Следует отметить, что в свое время были утверждены ГКЗ, в соответствии

с которыми запасы скандия составляли 15 т, а индия — 61,3 т [9, с. 55]. Запасы редких элементов, за исключением весьма редкого индия и нетипичного для этого формационного типа месторождений тантала, составляют сотни тонн. Особенно это касается висмута и скандия.

Техногенное сырье, образованное в процессе добычи открытым способом на карьере Сопка Большая, складировано в трех отвалах (Южный, Восточный, Северный) и представляет собой забалансовые руды, которые рассматривались при эксплуатации горного предприятия как объект освоения в будущем. За более чем 90-летний период хранения отходов (1932—2023 гг.) вещественный состав техногенного минерального сырья вследствие воздействия природных процессов (окисление, гидратация, увеличение поверхности взаимодействия

Таблица 3

Объем техногенного сырья в отвалах карьера Сопка Большая [по: Воросов, 1997 г.]
The volume of technogenic raw materials in the dumps of the Sopka quarry is Large
[according to: Vorosov, 1997]

Показатели	Отвалы упорных руд		Северный отвал, участки		
	Южный	Восточный	1	2	3
Площадь поверхности отвала, тыс. м ²	99	207,1	174,8	65,7	259,8
Количество горной массы, тыс. т	5460	21 036	102 808		
Запас руды, тыс. т	5370	12 542	58 477		
Высота отвала, м			40	от 17 до 39 на южном фланге	46

с агентами выветривания) изменился и в них сформировались геотехногенные месторождения. Объем геотехногенного сырья по отвалам карьера Сопка Большая представлен в табл. 3. Общие запасы горной массы этого сырья составляют 129 304 тыс. т, в том числе 76 389 тыс. т упорных руд. Высота отвалов в ряде мест достигает 46 м.

Если рассматривать в целом предприятия горного кластера (добывающие и перерабатывающие), то образовавшиеся техногенные отходы представляют собой отвальные хвосты Шерловогорской обогатительной фабрики, склады упорных труднообогатимых, а поэтому некондиционных, руд и окolorудноизмененной горной вскрыши карьера Сопка Большая. Масса техногенного сырья в хвостохранилище, по данным Ю.Ф. Харитоновой и В.Г. Васильева (1997 г.) и данным, частично опубликованным в работе, составляет 17 617,3 тыс. т. Общий объем этих техногенных массивов, в том числе руд, составляет 904 006,3 тыс. т.

Руды обогащались по комбинированной технологии, включавшей гравитационные и флотационные методы. Всего на 1 января 1991 г. добыто 22 516 тыс. т руды, из которых переработано 15 409 тыс. т, 7107 тыс. т, в связи с низким содержанием и упорностью, складировано в отвалы некондиционных руд. Извлечено в

концентраты около 15 тыс. т олова и вместе с ним — около 30 т индия. Вместе с касситеритом из россыпей, в которых содержалось в среднем 0,06% индия, извлечено около 1 тыс. т индия, а с вольфрамитом извлекался и скандий, содержание которого в нем составляло 0,026%.

Остаток руды в карьере Шерловогорского олово-полиметаллического месторождения составляет 22 712 тыс. т. При среднем содержании олова 0,1% это составляет 22 170 т, а запасы индия при содержании 1,52 г/т — 34,52 т. Суммарные запасы индия в оставшихся упорных рудах, хранящихся в складах, составляют 34,03 т.

Геотехногенный рельеф Шерловогорского рудного района относится к наиболее опасному кадмий-олово-сурьмяно-висмут-мышьяково-свинцово-цинковому геохимическому типу [20, с. 144; 21, р. 24643; 22]. Мышьяк, сурьма, кадмий содержатся в арсенопирите. В процессе длительного хранения мышьяк из техногенных отходов мигрировал в почву и техноземы, в природно-техногенный делювий, в почвообразующие горные породы. Содержание мышьяка в природных и техногенных грунтах достигало значений 1500—2000 г/т. При длительном воздействии на флору происходило кумулятивное накопление мышьяка в цветах, листьях, стеблях, корнях, семе-

нах растений. Химические вещества техногенных месторождений причиняют вред здоровью жителям поселка Шерловая Гора, ухудшают качество жизни и сокращают ее продолжительность. Деграция ландшафтного дизайна создает эстетический ущерб.

Для извлечения редких и цветных металлов, удаления мышьяка и кадмия на базе данных, полученных при изучении вещественного состава лежалых хвостов Шерловогорского ГОКа и отвалов карьера Сопка Большая, разработаны три альтернативных варианта технологий переработки отходов предприятий горного кластера:

- пирометаллургическая технология (см. рис. 3);
- пиро-гидрометаллургическая технология в периодическом режиме выщелачивания (см. рис. 4);
- гидрометаллургическая технология, состоящая из двух этапов: базовая флотационно-гидрометаллургическая технология — этап I (см. рис. 5), базовая гидрометаллургическая технология — этап II (см. рис. 6).

Извлечение редких элементов Bi, Cd, Sc, In, Be, Li, Nb и попутно цветных металлов Sn, Pb, Zn, W осуществляется с применением поэтапных локальных технологий с подбором способов обжига, дистилляции, плавки при пирометаллургии, выщелачивания и осаждения при гидрометаллургии, рафинирования черновых сплавов и очистки загрязненных растворов от примесей. Выбор наиболее эффективных селективных растворителей металлов и подбор оптимальных технологических условий извлечения основных и попутных компонентов должен осуществляться экспериментальным путем.

Поскольку особенностью как первичных руд, так и техногенных отвалов карьера, лежалых хвостов ШГОКа, является высокое содержание мышьяка,

целесообразно удалить эту вредную примесь в «голове» технологического процесса. Так, например, по разработанному альтернативному 1-му варианту пирометаллургической технологии переработки отходов предприятий горного кластера (см. рис. 3), удаление мышьяка может быть достигнуто при аналогичном использовании двухступенчатого обжига, как при предварительной подготовке пирит-арсенопиритовых концентратов, полученных при флотационном обогащении золотомышьяковых руд, перед цианированием [23, с. 183].

Окислительно-сульфидирующий обжиг (1-я ступень) протекает при температуре 500–550 °С при недостатке кислорода. Окислительный обжиг (2-я ступень) — при температуре 600–650 °С при избытке кислорода с расходом 0,25–0,3 л/мин. При двухступенчатом агломерирующем обжиге протекают химические реакции окисления арсенопирита диоксидом серы и сульфидирования элементарной серой.

При взаимодействии арсенопирита с SO_2 (г) протекают разветвленные цепные химические реакции с получением следующих соединений мышьяка: $FeAsS - As_2S_3$ (г) — As_4S_4 (г) — As_2O_3 (г) — As_2O_5 .

Аналогичный механизм взаимодействия осуществляется между арсенопиритом, серой и кислородом с образованием из $FeAsS$ следующих химических веществ: As_2S_3 (г) — As_4S_4 (г). При этом следует отметить, что As_4S_4 является малотоксичным легколетучим тетрасульфидом тетрамышьяка (бинарное неорганическое соединение мышьяка и серы). Содержание As в возгонах составляет не менее 70%, извлечение мышьяка — не менее 95,0%.

Полученный As_4S_4 является товарным продуктом для производства мышьяка, который используется в качестве легирующей добавки в сплавах свинца,

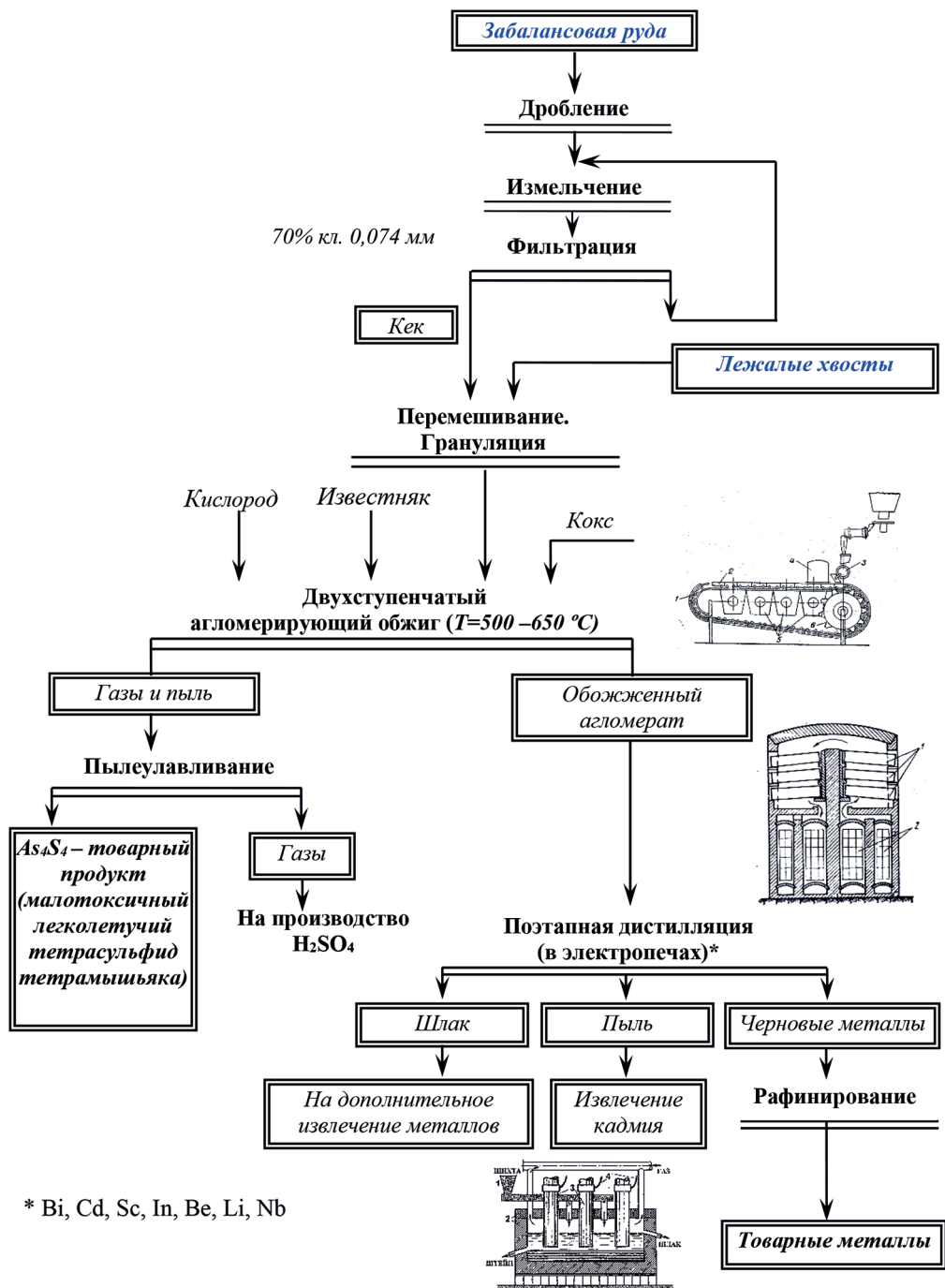


Рис. 3. Пирометаллургическая технология извлечения редких и цветных металлов из отходов предприятий горного кластера

Fig. 3. Pyrometallurgical technology of extraction of rare and non-ferrous metals from waste of mining cluster enterprises

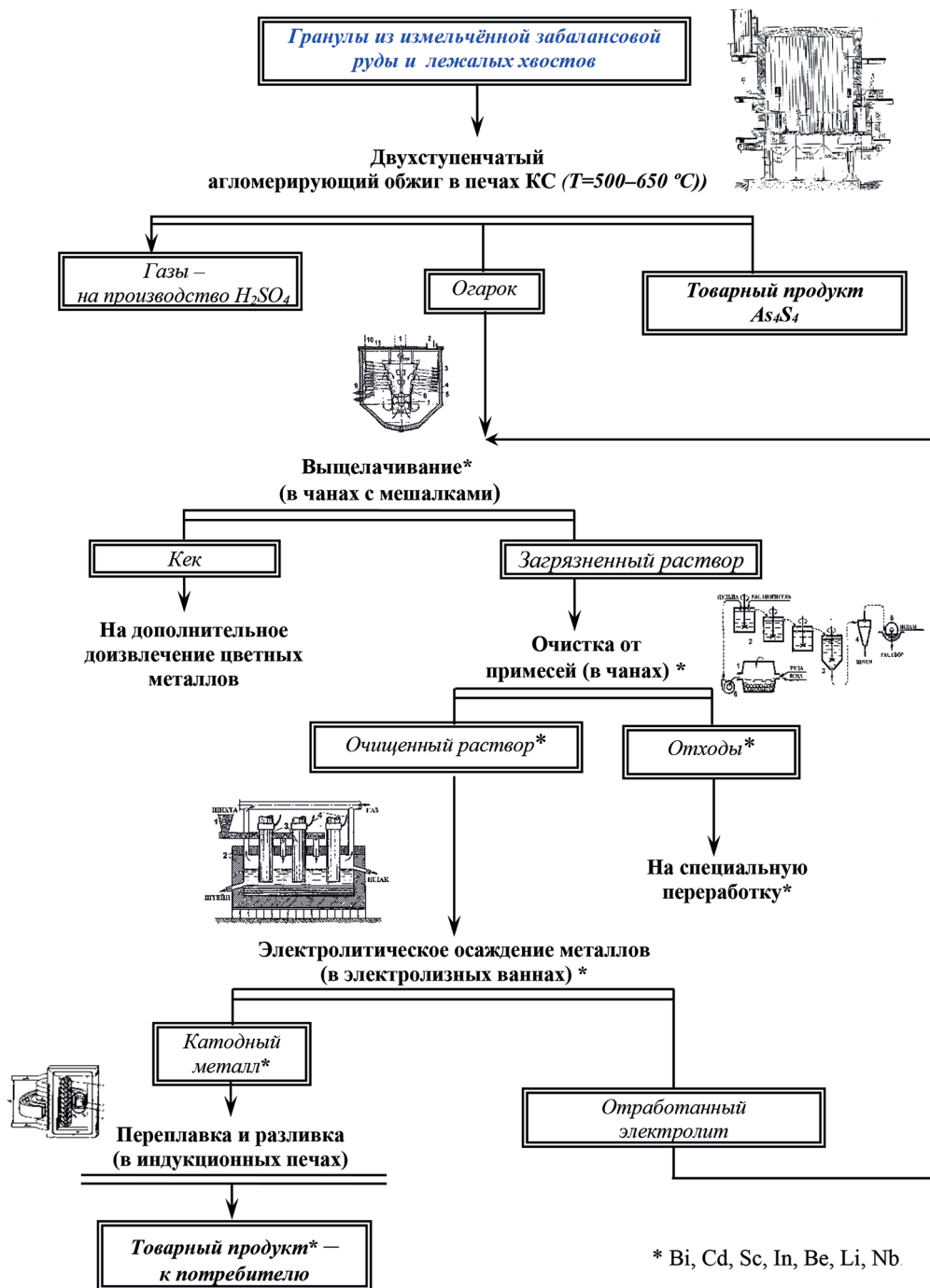


Рис. 4. Пиро-гидрометаллургическая технология извлечения редких и цветных металлов в периодическом режиме выщелачивания отходов предприятий горного кластера

Fig. 4. Pyro-hydrometallurgical technology for the extraction of rare and non-ferrous metals in the periodic leaching of waste from mining cluster enterprises

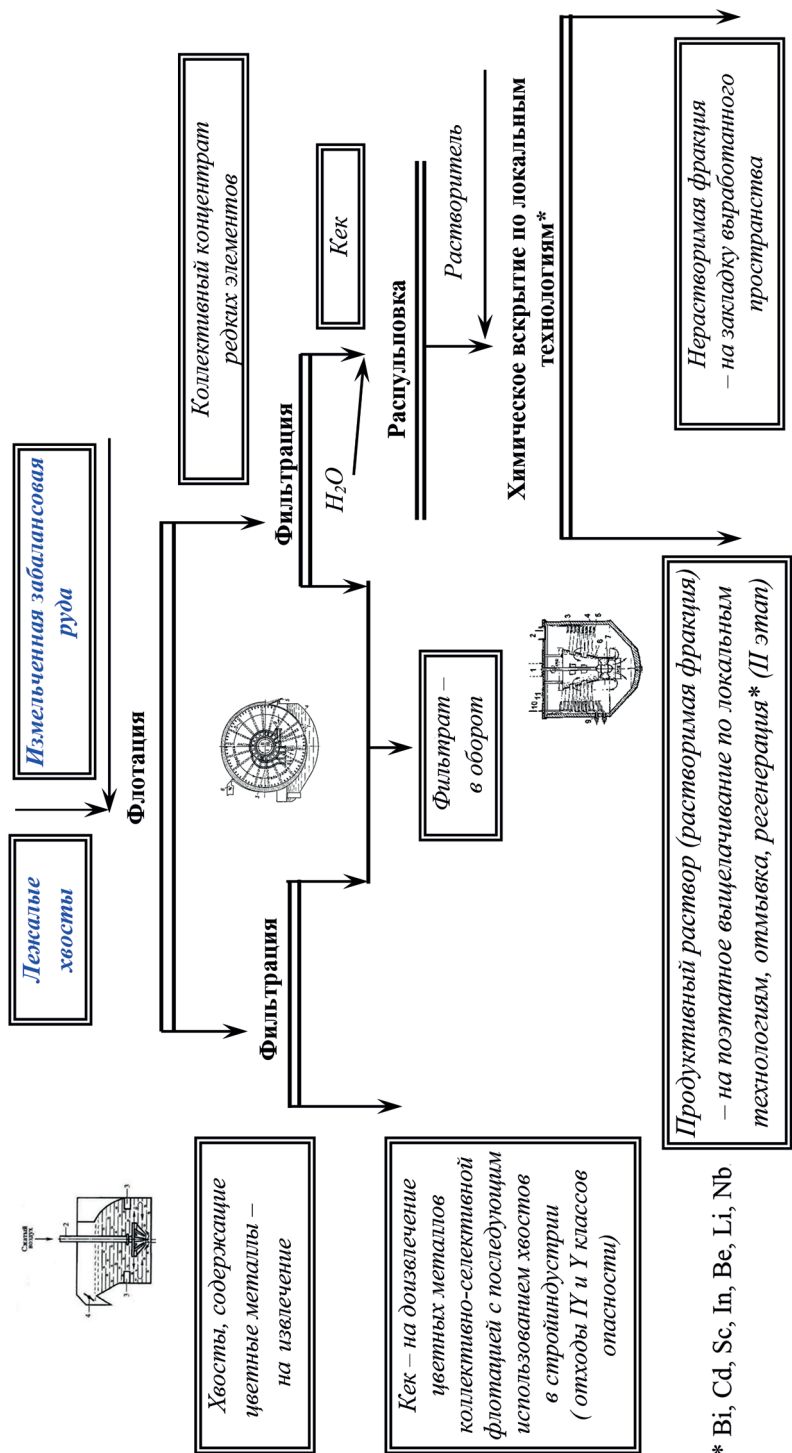
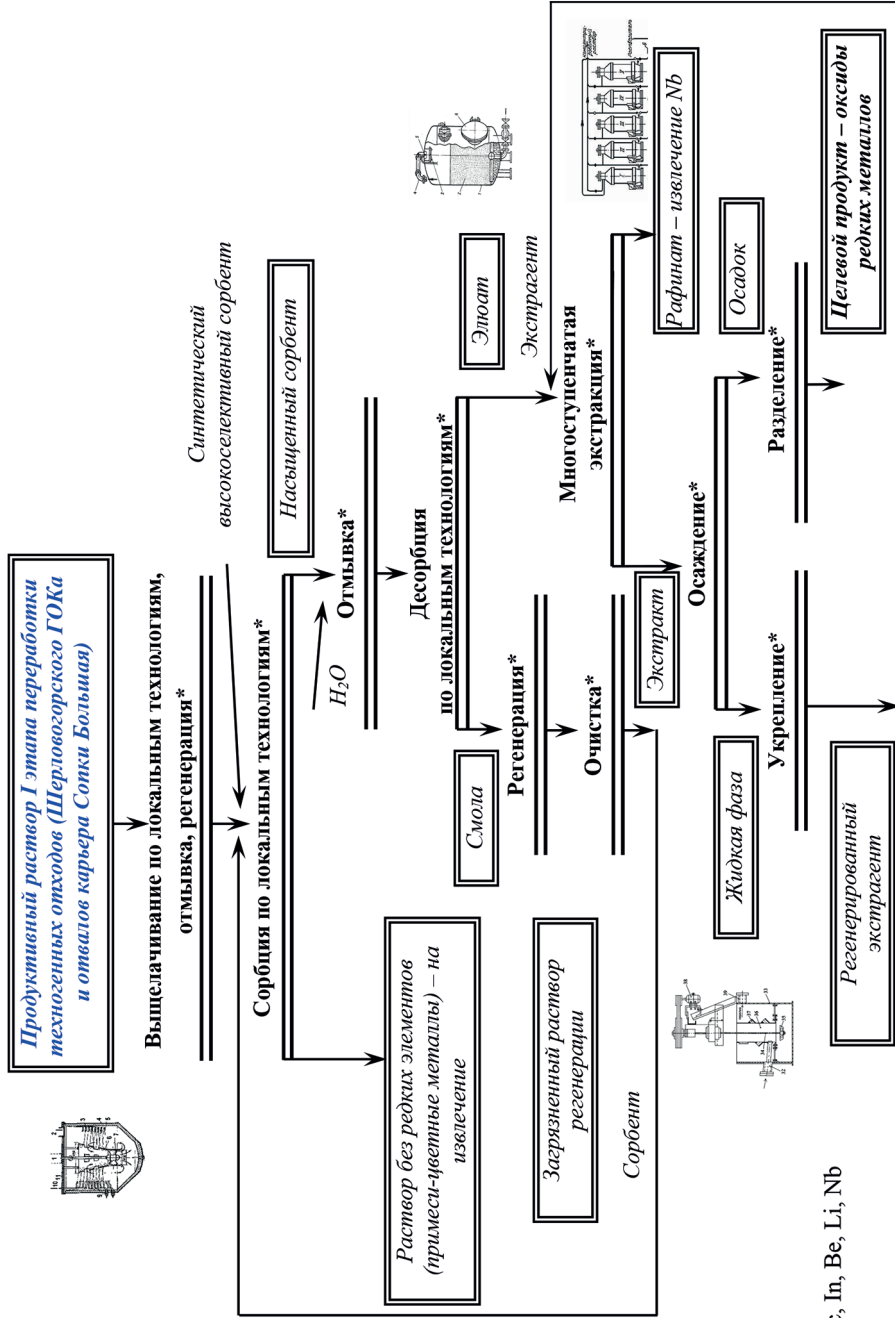


Рис. 5. Базовая флотационно-гидрометаллургическая технология (этап I) переработки отходов предприятий горного кластера
 Fig. 5. Basic flotation-hydrometallurgical technology (Stage I) of waste processing of mining cluster enterprises



* Bi, Cd, Sc, In, V, Li, Nb

Рис. 6. Базовая гидрометаллургическая технология с поэтапным извлечением редких и цветных металлов (этап II) из отходов предприятий горного кластера

Fig. 6. Basic hydrometallurgical technology with step-by-step extraction of rare and non-ferrous metals (Stage II) from waste of mining cluster enterprises

в производстве боеприпасов, для синтеза полупроводниковых материалов (арсенидов) и создания сложных алмазоподобных полупроводников, стекла, красителей, тканей, бумаги, клея, консервантов. Полученные при двухступенчатом агломерирующем обжиге соединения серы являются химическим сырьем, которое идет на производство серной кислоты.

Заключение

1. Анализ вещественного состава лежалых хвостов гравитационно-флотационного способа обогащения Шерловогорского ГОКа показал, что запасы редких элементов, за исключением весьма редкого индия и нетипичного для этого формационного типа месторождений тантала, составляют сотни тонн. Особенно это касается висмута и скандия.

2. Масса техногенного сырья хвостохранилища Шерловогорского ГОКа составляет 17 617,3 тыс. т. Остаток забалансовой олово-полиметаллической руды отвалов карьера Сопка Большая составляет 22 712 тыс. т.

3. Полученные расчеты показали, что запасы примесных полезных компонентов в хвостохранилище составляют: для скандия — 2078,8 т, для висмута — 369,38 т, для кадмия — 192 т, для бериллия — 192 т, для лития — 704 т, а также 174,3 т серебра. Хвостохранилище содержит также (тыс. т): 45,8 свинца, 72,2 цинка, 10 олова и 1,8 вольфрама.

4. Разработаны три альтернативных варианта технологии переработки отходов предприятий горного кластера с целью извлечения редких и попутно цвет-

ных металлов: пирометаллургическая; пиро-гидрометаллургическая в периодическом режиме выщелачивания; гидрометаллургическая, состоящая из двух этапов (базовая флотационно-гидрометаллургическая технология — этап I, базовая гидрометаллургическая технология с поэтапным извлечением металлов — этап II).

Экономически целесообразно перерабатывать отходы горнодобывающего и горно-перерабатывающего предприятий совместно по единой технологии, по одному из трех альтернативных вариантов, выбор которой зависит от вещественного состава минерального сырья. Извлечение редких элементов Bi, Cd, Sc, In, Be, Li, Nb и попутно цветных металлов Sn, Pb, Zn, W осуществляется по поэтапным локальным технологиям.

5. Наряду с получением значительного количества полезных компонентов разработанная комбинированная технология позволит существенно снизить экологическую опасность отходов деятельности Шерловогорского ГОКа и карьера Сопка Большая. Мышьяк утилизируется при двухступенчатом обжиге в виде малотоксичного товарного продукта As_4S_4 .

6. Перспективные задачи исследований — проверка разработанных технологий экспериментально и определение оптимальных технологических режимных параметров процессов, входящих в технологические схемы переработки лежалых хвостов гравитационно-флотационного обогащения олово-полиметаллических руд Шерловогорского месторождения и геотехногенного сырья отвалов карьера Сопка Большая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Круппская Л. Т., Зверева В. П., Складорова Г. Ф., Орлов А. М. Техногенные поверхностные образования как источник загрязнения экосферы и обоснование возможности их освоения в Дальневосточном федеральном округе // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2. — С. 5 — 21. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-5-21.

2. Зверева В. П., Фролов К. Р., Лысенко А. И. Химические реакции и условия минералообразования на хвостохранилищах Дальнего Востока России // Горные науки и технологии. — 2021. — Т. 6. — № 3. — С. 181–191. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-3-181-191.
3. Kolesnikova O., Syrlybekkyzy S., Fediuk R, Yerzhanov A., Nadirov R., Utelbayeva A., Agabekova A., Latypova M., Chepelyan L., Volokitina I., Vatin N. I., Kolesnikov A., Amran M. Thermodynamic simulation of environmental and population protection by utilization of technogenic tailings of enrichment // Materials. 2022, vol. 15, no. 19, article 6980. DOI: 10.3390/ma15196980.
4. Duszyński F., Migoń P., Strzelecki M. C. Escarpment retreat in sedimentary tablelands and cuesta landscapes — Landforms, mechanisms and patterns // Earth-Science Reviews. 2019, vol. 196, article 102890. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102890.
5. Singh V. K., Ansari T. A., Vishal V., Singh T. Landslide susceptibility analysis using numerical and neural network, Near Kedarnath, Uttarakhand, India // American Journal of Environmental Sciences. 2020, vol. 16, no. 1, pp. 8–20. DOI: 10.3844/ajessp.2020.8.20.
6. Юшина Т. И., Петров И. М., Гришаев С. И., Черный С. А. Обзор рынка РЗМ и технологий переработки редкоземельного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № S1. — С. 577–607.
7. Бойко С. М., Трошин Ю. П., Маркова М. Е., Михеева Э. И., Алексеева Н. И. Элементы-примеси в касситеритах оловорудных месторождений как индикатор зонального распределения компонентов в рудных телах // Записки Забайкальского филиала Географического общества СССР. — 1982. — № 48. — С. 39–43.
8. Дементьев В. Е., Войлошников Г. И., Федоров Ю. О. Разработка ОА «ИРГИРЕДМЕТ» по извлечению ценных компонентов из техногенного сырья // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2020. — № 4. — С. 418–427.
9. Шумилова Л. В., Юргенсон Г. А. Роль химии и микробиологии в сфере горного дела: состояние проблемы и перспективные задачи // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 3-1. — С. 40–55. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_31_0_40.
10. Гайворонский Б. А. Шерловогорское месторождение / Месторождения Забайкалья. Т. 1, кн. 1. — Чита-М., 1995. — С. 130–133.
11. Шумилова Л. В., Юргенсон Г. А., Хатькова А. Н. Отходы разработки оловополиметаллических месторождений Забайкалья и физико-химическая геотехнология извлечения комплекса редких и цветных металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 9. — С. 156–168. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_156.
12. Соловьева В. М., Череповицын А. Е. Организационно-экономические модели развития редкоземельных промышленных комплексов: российский и зарубежный опыт // Вестник ЮРГТУ (НПИ). Серия: Социально-экономические науки. — 2021. — № 1. — С. 188–202.
13. Нечаев А. В., Поляков Е. Г., Белоусова Е. Б., Пикалова В. С., Быховский Л. З. Минерально-сырьевая база ниобия России: приоритеты освоения // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2020. — № 4-5. — С. 8–15.
14. Алексашина Т. В. Развитие и методы управления редкометаллической промышленностью в РФ // Вестник Алтайской академии экономики и права. — 2022. — № 7-1. — С. 13–17. <https://vael.ru/ru/article/view?id=2293> (дата обращения: 24.10.2023).
15. Юргенсон Г. А. Ландшафтно-геохимические и геоэтичные проблемы исторических горнопромышленных территорий на примере Забайкалья // Горный журнал. — 2020. — № 5. — С. 81–86. DOI: 10.17580/gzh.2020.5.15.
16. Димухамедов Р. Р., Хромова Е. А. Проблемные вопросы добычи и производства редких и редкоземельных металлов // Разведка и охрана недр. — 2022. — № 3. — С. 64–67.
17. Lifton J. The global technology metals markets: A conference primer. InvestorIntel. Aug. 16, 2015, pp. 1–6.

18. Крюков Я. В., Самсонов М. Ю., Яценко В. А. Российская редкоземельная промышленность: следует ли перенять опыт Китая? // ЭКО. — 2018. — № 10. — С. 138—152.

19. Яценко В. А., Самсонов Н. Ю., Крюков Я. В. Опционный подход к экономической оценке проектов разработки редкоземельных месторождений // Мир экономики и управления. — 2018. — Т. 18. — № 4. — С. 69—84. DOI: 10.25205/2542-0429-2018-18-4-69-84.

20. Абрамов Б. Н. Оценка токсичности хвостохранилищ рудных месторождений Забайкальского края // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11. — С. 136—145. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_136.

21. Lu J., Lu H., Lei K., Wang W., Guan Yu. Contamination of soil and water resources with trace elements of metals caused by small-scale mining of metal ore: a case study at a sphalerite mine in Northern China // Environmental Science and Pollution Research. 2019, vol. 26, no. 24, pp. 24630—24644. DOI: 10.1007/s11356-019-05703-z.

22. Крюков В. А., Яценко В. А., Крюков Я. В. Редкоземельная промышленность — реализовать имеющиеся возможности // Горная промышленность. — 2020. — № 5. — С. 68—84. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-5-68-84.

23. Гурман М. А. Использование термодимических методов при переработке золото-содержащих пирит-арсенипиритовых концентратов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — Об 4. — С. 180—186

24. USMMA Defence supply chain assessment. Select systems employng rare Earth. 10/7/2010, available at: <http://www.usmagneticmaterials.com/documents/USMMA-DOD-Supply-Chain-Assessment-v6.pdf>. Официальный сайт компании — <http://www.electromech.com>. **VIAB**

REFERENCES

1. Krupskaya L. T., Zvereva V. P., Sklyarova G. F., Orlov A. M. Aboveground mining waste storage as an ecosystem pollution source and waste exploitability in Russia's Far East. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2, pp. 5—21. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-5-21.

2. Zvereva V. P., Frolov K. R., Lysenko A. I. Chemical reactions and conditions of mineral formation at tailings dumps of the Russian Far East. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021, vol. 6, no. 3, pp. 181—191. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-3-181-191.

3. Kolesnikova O., Syrlybekkyzy S., Fediuk R., Yerzhanov A., Nadirov R., Utebayeva A., Agabekova A., Latypova M., Chepelyan L., Volokitina I., Vatin N. I., Kolesnikov A., Amran M. Thermodynamic simulation of environmental and population protection by utilization of technogenic tailings of enrichment. *Materials*. 2022, vol. 15, no. 19, article 6980. DOI: 10.3390/ma15196980.

4. Duszyński F., Migoń P., Strzelecki M. C. Escarpment retreat in sedimentary tablelands and cuesta landscapes — Landforms, mechanisms and patterns. *Earth-Science Reviews*. 2019, vol. 196, article 102890. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102890.

5. Singh V. K., Ansari T. A., Vishal V., Singh T. Landslide susceptibility analysis using numerical and neural network, Near Kedarnath, Uttarakhand, India. *American Journal of Environmental Sciences*. 2020, vol. 16, no. 1, pp. 8—20. DOI: 10.3844/ajessp.2020.8.20.

6. Yushina T. I., Petrov I. M., Grishaev S. I., Cherny S. A. Review of the market of REM and technologies for processing rare earth raw materials. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. S1, pp. 577—607. [In Russ].

7. Boyko S. M., Troshin Yu. P., Markova M. E., Mikheeva E. I., Alekseeva N. I. Impurity elements in cassiterites of tin ore deposits as an indicator of the zonal distribution of components in ore bodies. *Zapiski Zabaykal'skogo filiala Geograficheskogo obshchestva SSSR*. 1982, no. 48, pp. 39—43. [In Russ].

8. Dementiev V. E., Voiloshnikov G. I., Fedorov Yu. O. Development of the OA «IRGIREDMET» for the extraction of valuable components from technogenic raw materials. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 4, pp. 418—427. [In Russ].

9. Shumilova L. V., Yurgenson G. A. The role of chemistry and microbiology in the field of mining: the state of the problem and promising tasks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 3-1, pp. 40 – 55. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_31_0_40.
10. Gaivoronsky B. A. Sherlovogorskoye field. *Mestorozhdeniya Zabaykal'ya* [Deposits of Transbaikalia], vol. 1, book 1, Chita-Moscow, 1995, pp. 130 – 133.
11. Shumilova L. V., Yurgenson G. A., Khatkova A. N. Tin-bearing polymetallic ore mining in Transbaikalia and physicochemical geotechnology of extraction of rare and nonferrous metals. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 9, pp. 156 – 168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_156.
12. Solovyova V. M., Cherepovitsyn A. E. Organizational and economic models of development of rare-earth industrial complexes: Russian and foreign experience. *Bulletin of the South-Russian state technical University (NPI). Series Socio-economic Sciences.* 2021, no. 1, pp. 188 – 202. [In Russ].
13. Nechaev A. V., Polyakov E. G., Belousova E. B., Pikalova V. S., Bykhovsky L. Z. Mineral resource base of niobium of Russia: priorities of development. *Mineral Recourses of Russia. Economics & management.* 2020, no. 4-5, pp. 8 – 15. [In Russ].
14. Aleksashina T. V. Development and management methods of the rare metal industry in the Russian Federation. *Journal of Altai academy of economics and law.* 2022, no. 7-1, pp. 13 – 17, available at: <https://vael.ru/ru/article/view?id=2293> (accessed 24.10.2023). [In Russ].
15. Yurgenson G. A. Landscape-geochemical and geo-ethical problems of historical mining territories on the example of Transbaikalia. *Gornyi Zhurnal.* 2020, no. 5, pp. 81 – 86. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.5.15.
16. Dimukhamedov R. R., Khromova E. A. Problematic issues of mining and production of rare and rare earth metals. *Prospect and protection of mineral resources.* 2022, no. 3, pp. 64 – 67. [In Russ].
17. Lifton J. *The global technology metals markets: A conference primer.* InvestorIntel. Aug. 16, 2015, pp. 1 – 6.
18. Kryukov Ya. V., Samsonov M. Yu., Yatsenko V. A. Russian rare earth industry: should we adopt the experience of China? *ECO.* 2018, no. 10, pp. 138 – 152. [In Russ].
19. Yatsenko V. A., Samsonov N. Yu., Kryukov Ya. V. An optional approach to the economic assessment of projects for the development of rare earth deposits. *World of economics and management.* 2018, vol. 18, no. 4, pp. 69 – 84. [In Russ]. DOI: 10.25205/2542-0429-2018-18-4-69-84.
20. Abramov B. N. Toxicity assessment of mine tailings ponds in Transbaikalia. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 11, pp. 136 – 145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_136.
21. Lu J., Lu H., Lei K., Wang W., Guan Yu. Contamination of soil and water resources with trace elements of metals caused by small-scale mining of metal ore: a case study at a sphalerite mine in Northern China. *Environmental Science and Pollution Research.* 2019, vol. 26, no. 24, pp. 24630 – 24644. DOI: 10.1007/s11356-019-05703-z.
22. Kryukov V. A., Yatsenko V. A., Kryukov Ya. V. Rare earth industry – to realize the available opportunities. *Russian Mining Industry.* 2020, no. 5, pp. 68 – 84. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-5-68-84.
23. Gurman M. A. The use of thermochemical methods in the processing of gold-containing pyrite-arsenopyrite concentrates. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2013, special edition 4, pp. 180 – 186. [In Russ].
24. *USMMA Defence supply chain assessment.* Select systems employng rare Earth. 10/7/2010, available at: <http://www.usmagneticmaterials.com/documents/USMMA-DOD-Supply-Chain-Assessment-v6.pdf>. Official website of the company – <http://www.electromech.com>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Шумилова Лидия Владимировна*¹ — д-р техн. наук,
доцент, профессор,

e-mail: shumilovalv@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-5991-9204,

*Хатькова Алиса Николаевна*¹ — д-р техн. наук,
профессор, профессор,

e-mail: alisa1965.65@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-6527-0026,

*Размахнин Константин Константинович*¹ — д-р техн. наук,
доцент, доцент,

e-mail: igdranchita@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2944-7642,

*Простакишин Михаил Федорович*¹ — исполнитель
проекта РНФ № 22-17-00040,

e-mail: m.prostakishin@gmail.com,

¹ Забайкальский государственный университет.

Для контактов: Шумилова Л.В., e-mail: shumilovalv@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*L.V. Shumilova*¹, Dr. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, Professor,

e-mail: shumilovalv@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-5991-9204,

*A.N. Khatkova*¹, Dr. Sci. (Eng.),

Professor, Professor,

e-mail: alisa1965.65@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0001-6527-0026,

*K.K. Razmakhnin*¹, Dr. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, Assistant Professor,

e-mail: igdranchita@mail.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2944-7642,

*M.F. Prostakishin*¹, Executor of Project
No. 22-17-00040,

e-mail: m.prostakishin@gmail.com,

¹ Transbaikal State University,

672039, Chita, Russia.

Corresponding author: L.V. Shumilova, e-mail: shumilovalv@mail.ru.

Получена редакцией 18.08.2023; получена после рецензии 07.10.2023; принята к печати 10.11.2023.

Received by the editors 18.08.2023; received after the review 07.10.2023; accepted for printing 10.11.2023.

