

Переработка хвостов обогащения как источник редкоземельных элементов при освоении техногенных месторождений России

Л.Г. Руденко✉, Н.Н. Губская, Е.П. Петухова, А.В. Овсянникова, Е.М. Торбик

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация

✉ mila.k07@mail.ru

Резюме: Исследована проблема извлечения редкоземельных элементов из хвостов обогащения горно-обогатительных комбинатов Российской Федерации, рассматриваемых в качестве перспективных техногенных месторождений. Актуальность обусловлена критической зависимостью России от импорта разделённых оксидов редкоземельных элементов (до 75% внутреннего потребления при наличии 28,5 млн т балансовых запасов) и нарастающим экологическим давлением на хвостохранилища, аккумулировавших свыше 8 млрд т отходов обогащения. Гипотеза исследования: комбинированная технологическая схема, включающая физическое предконцентрирование с последующим селективным гидрометаллургическим выщелачиванием, обеспечивает экономически рентабельное извлечение редкоземельных элементов из хвостов с содержанием ΣTR_2O_3 не ниже 0,25%. Цель работы – технико-экономическое обоснование переработки хвостов обогащения как альтернативного источника редкоземельных элементов в контексте программы импортозамещения до 2030 г. Применены методы сравнительного геохимического анализа, сценарного технико-экономического моделирования (NPV, IRR, DPP) и лабораторного исследования эффективности извлечения с использованием данных ИСП-МС, РФА и SEM-EDS. Эмпирическую базу составили геохимические характеристики хвостов семи крупнейших техногенных объектов Российской Федерации (Хибинские ОФ, Ловозерский ГОК, Качканарский ГОК, Мундыбашская ОФ, Солнечный ГОК, фосфогипсовые отвалы, хвосты ФосАгро), а также данные государственного баланса запасов (2022–2025). Установлено, что суммарный ресурсный потенциал редкоземельных элементов в хвостах оценивается в 3,8–4,6 млн т ΣTR_2O_3 , при этом комбинированная технология обеспечивает извлечение 78–88% с получением концентратов чистотой 92–96%. Технико-экономическое моделирование демонстрирует положительный NPV от 6,94 млрд руб. при базовом сценарии (содержание 0,35%, $r = 12\%$), IRR = 19,2% и срок окупаемости 5,8 лет. Экологический эффект от переработки 500 тыс. т хвостов/год выражается в сокращении эмиссии CO_2 -эквивалента на 18,7 тыс. т/год. Результаты подтверждают промышленную значимость техногенных месторождений как стратегического ресурса для обеспечения технологического суверенитета страны в области критических минералов.

Ключевые слова: редкоземельные элементы, хвосты обогащения, техногенные месторождения, гидрометаллургическое выщелачивание, предконцентрирование, технико-экономическая оценка, циркулярная экономика

Для цитирования: Руденко Л.Г., Губская Н.Н., Петухова Е.П., Овсянникова А.В., Торбик Е.М. Переработка хвостов обогащения как источник редкоземельных элементов при освоении техногенных месторождений России. *Горная промышленность*. 2026;(3):62–70. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-62-70>

Processing of mill tailings as a source of rare earth elements in the development of Russian man-made deposits

L.G. Rudenko ✉, N.N. Gubskaya, E.P. Petukhova, A.V. Ovsyannikova, E.M. Torbik

Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

✉ mila.k07@mail.ru

Abstract: This paper examines the issue of extracting the rare earth elements (REEs) from tailings of Russian mining and processing plants, which are recognized as promising man-made deposits. This research is relevant due to Russia's critical dependence on imported separated REE oxides (up to 75% of the domestic consumption, with 28.5 million tons of the balance reserves) and the growing environmental pressure from the tailings dams, which have accumulated over 8 billion tons of mining waste. The study's hypothesis is that a combined process flowsheet, including physical pre-concentration followed by selective hydrometallurgical leaching, ensures economically viable extraction of REEs from tailings with the ΣTR_2O_3 content of at least 0.25%. The objective of this study is to conduct a feasibility study for processing mill tailings as an alternative source of the rare earth elements (REE) as part of the import substitution program up to 2030. The methods of comparative geochemical analysis, scenario-based technical and economic modeling (NPV, IRR, DPP), and a laboratory study of the extraction efficiency using the ICP-MS, X-ray fluorescence,

and SEM-EDS data were applied. The empirical base included geochemical characteristics of tailings from seven of the largest man-made tailings in the Russian Federation (the Khibiny Processing Plants, the Lovozero Mining and Processing Plant, the Kachkanarsky Mining and Processing Plant, the Mundybash Processing Plant, the Solnechny Mining and Processing Plant, phosphogypsum dumps, and the PhosAgro tailings), as well as data from the state reserve balance (2022–2025). The total REE resource potential of the tailing dumps was estimated at 3.8–4.6 million t of ΣTR_2O_3 , with the combined technology providing a recovery of 78–88% of the REEs with the concentrate purity of 92–96%. Technical and economic modeling demonstrates a positive NPV of RUB 6.94 billion under the baseline scenario (0.35% grade, $r = 12\%$), an IRR of 19.2%, and a payback period of 5.8 years. The environmental benefit of processing 500,000 t of tailings per year results in a reduction in the CO_2 -equivalent emissions of 18.7 thousand t/year. The results confirm the industrial value of man-made deposits as a strategic resource for ensuring the country's technological sovereignty in the field of critical minerals.

Keywords: rare earth elements, mill tailings, man-made deposits, hydrometallurgical leaching, pre-concentration, feasibility study, circular economy

For citation: Rudenko L.G., Gubskaya N.N., Petukhova E.P., Ovsyannikova A.V., Torbik E.M. Processing of mill tailings as a source of rare earth elements in the development of Russian man-made deposits. *Russian Mining Industry*. 2026;(3):62–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-3-62-70>

Введение

Глобальное потребление редкоземельных элементов достигло 350 тыс. т в пересчёте на оксиды (REO) в 2023 г., при этом Китай контролирует 69% мировой добычи и 80–95% переработки в зависимости от индивидуального элемента¹. Критическая концентрация производственных цепочек в одной юрисдикции трансформировалась из экономического риска в геополитический вызов после введения КНР экспортных ограничений на тяжёлые редкоземельные элементы (РЗЭ) в 2024–2025 гг. Россия, располагая запасами 28,5 млн т РЗЭ (четвёртое место в мире), фактически эксплуатирует единственное целевое предприятие – Ловозерский ГОК с годовой производительностью около 2,6 тыс. т лопаритового концентрата, что покрывает менее 25% внутреннего потребления, оцениваемого в 1,42 тыс. т разделённых оксидов². Дорожная карта правительства РФ «Технологии новых материалов и веществ» предусматривает увеличение производства до 7500 т REO к 2030 г. и сокращение импортозависимости с 75 до 45%, что требует ввода принципиально новых источников сырья³. Параллельно с дефицитом первичного производства на территории страны накоплено свыше 8 млрд т отходов обогащения, занимающих площадь более 300 тыс. га [1]. Хвостохранилища крупнейших горно-обогатительных комбинатов содержат значительные концентрации РЗЭ, не извлечённых при первичной переработке руд: от 0,08% Sc_2O_3 на Качканарском ГОКе до 1,12% ΣTR_2O_3 в лопаритовых хвостах Ловозерского ГОКа [2]. Согласно ГОСТ Р 59071–2020 такие скопления квалифицируются как техногенные месторождения при условии положительной геолого-экономической оценки. Переработка хвостов предоставляет тройное преимущество: расширение сырьевой базы без вскрытия новых месторождений, снижение экологической нагрузки и получение попутных продуктов (строительные материалы, оксиды титана, скандия) для закладки выработанного пространства [3].

Современная научная литература фиксирует прорывные результаты в области извлечения РЗЭ из вторичных источников. Последовательное выщелачивание с контролируе-

мым pH позволяет удвоить концентрацию РЗЭ в продуктивном растворе по сравнению с одностадийным процессом, а селективная экстракция реагентами Cyanex 572 и D2ЕНРА обеспечивает получение оксалатных осадков чистотой 92–96% [4]. Биовыщелачивание с использованием микробных сообществ (*Acidithiobacillus*, *Aspergillus niger*) демонстрирует снижение операционных затрат на 35–40% по сравнению с кислотными методами при обработке бедных хвостов ($\Sigma TR_2O_3 < 0,3\%$) [5]. Вместе с тем систематическая оценка техногенных объектов РФ как единого ресурсного фонда с позиций технико-экономической рентабельности до сих пор не проводилась, что определяет научную новизну настоящего исследования.

Гипотеза: комбинированная технологическая схема (физическое предконцентрирование + селективное гидрометаллургическое выщелачивание) обеспечивает положительный чистый дисконтированный доход при переработке хвостов с содержанием $\Sigma TR_2O_3 \geq 0,25\%$ и производительности ≥ 500 тыс. т/год.

Цель исследования – комплексная технико-экономическая оценка ресурсного потенциала хвостов обогащения основных ГОКов России как источника РЗЭ и обоснование оптимальной технологической стратегии их переработки.

Задачи: 1) систематизировать геохимические данные по содержанию РЗЭ в хвостах ключевых техногенных объектов; 2) сравнить эффективность технологий извлечения; 3) провести сценарное моделирование экономических параметров проекта; 4) оценить экологический эффект и перспективы масштабирования.

Материалы и методы

Исследование выполнено в 2023–2025 гг. на эмпирической базе, включающей геохимические характеристики хвостов обогащения семи техногенных объектов РФ: хвостохранилища Хибинских обогатительных фабрик АО «Апатит» (Мурманская обл.), Ловозерского ГОКа (Мурманская обл.), шламоохранилище ЕВРАЗ Качканарского ГОКа (Свердловская обл.), Мундыбашской ОФ (Кемеровская обл.), Солнечного ГОКа (Хабаровский край), фосфогипсовых отвалов химических предприятий (Балаково, Воскресенск) и хвостов флотации ПАО «ФосАгро». Критериями отбора объектов служили: накопленный объём хвостов > 40 млн т; наличие аналитических данных по содержанию РЗЭ за период 2018–2025 гг.; документальное подтверждение статуса техногенного месторождения или потенциала

1 U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2025: Rare Earths. Reston, VA: USGS; 2025, pp. 140–141. Available at: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-rare-earths.pdf> (accessed: 29.03.2026).

2 О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году: государственный доклад. М.: Минприроды России; 2024. 626 с.

3 Дорожная карта «Технологии новых материалов и веществ»: направление «Редкие и редкоземельные металлы». М.: 2024. 48 с.

Таблица 1

Геохимическая характеристика и ресурсный потенциал редкоземельных элементов в хвостах обогащения ключевых техногенных объектов Российской Федерации

Table 1

Geochemical characteristics and the resource potential for rare earth elements of tailings from the key industrial sites in the Russian Federation

Техногенный объект	Накопленный объём, млн т	ΣTR_2O_3 , %	Доминирующие РЗЭ	Ресурсы ΣTR_2O_3 , тыс. т*	Минералы-носители РЗЭ
Хибинские ОФ (АО «Апатит»)	650	0,34	Ce, La, Nd	2 210	Апатит, сфен, лопарит
Ловозерский ГОК	45	1,12	Ce, La, Nd, Pr	504	Лопарит, эвдиалит
ЕВРАЗ Качканарский ГОК**	900	0,015 (Sc ₂ O ₃ : 0,008)	Sc, Y, Ti	135 (Sc ₂ O ₃ : 72)	Пироксены, титаномагнетит
Мундыбашская ОФ	130	0,15	Y, Ce, La	195	Гранат, пироксен
Солнечный ГОК	85	0,22	Y, Dy, Ce	187	Касситерит (вкл.), флюорит
Фосфогипс (хим. заводы)	300	0,42	Ce, Nd, La, Y	1 260	Фосфогипс (изоморфные замещения)
Хвосты флотации ФосАгро	480	0,28	Ce, La, Nd	1 344	Апатит, сфен

Примечание: данные по содержанию РЗЭ приведены на основе аналитических результатов 2018–2025 гг.; * ресурсы ΣTR_2O_3 – оценочные, рассчитаны как произведение массы хвостов на среднее содержание; ** раздельно указано ΣTR_2O_3 и Sc₂O₃ ввиду доминирования последнего в ресурсной структуре, количество Sc₂O₃ превышает 100 тыс. т – более 60% мировых запасов этого металла.

Note: information on the content of the rare earth elements (REE) is based on analytical results from 2018–2025; * ΣTR_2O_3 resources are estimated, calculated as the product of the tailings weight and the average content; ** ΣTR_2O_3 and Sc₂O₃ are listed separately due to the dominance of the latter in the resource structure; the amount of Sc₂O₃ exceeds 100,000 tonnes, i.e. more than 60% of the global reserves of this metal.

его присвоения. Минералогический и элементный состав хвостов охарактеризован методами рентгенофазового анализа (дифрактометр Bruker D8 Advance, CuK α -излучение), масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС, Agilent 7900) и растровой электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом (SEM-EDS, JEOL JSM-7600F). Предел обнаружения для индивидуальных РЗЭ составил 0,01 мг/кг. Пробоподготовка включала квартование, измельчение до крупности –74 мкм и разложение навески (0,1 г) в смеси HF + HNO₃ + HClO₄ при температуре 200°C в автоклавной системе.

Технологические эксперименты по извлечению РЗЭ проведены на лабораторных и укрупнённо-лабораторных установках по четырём вариантам: кислотное выщелачивание (H₂SO₄, 2–6 М, 80–150°C, 2–6 ч); щелочное спекание с NaOH (300–400°C) с последующим водным выщелачиванием; биовыщелачивание (культура Acidithiobacillus thiooxidans, pH 1,5–2,0, 30°C, 14 сут); комбинированная схема (гравитационное и магнитное предконцентрирование + кислотное выщелачивание обогащённого продукта). Каждый опыт проведён в трёхкратной повторности; статистическая обработка – по *t*-критерию Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Коэффициент вариации не превышал 6,8%.

Технико-экономическое моделирование выполнено методом дисконтированных денежных потоков (DCF) для трёх сценариев, различающихся содержанием ΣTR_2O_3 (0,15; 0,35; 0,80%) и степенью извлечения (62; 78; 88%). Ставка дисконтирования принята 12% (WACC для горнодобывающих проектов РФ). Ценовые параметры: ЛРЗЭ-оксиды – 3600 руб/кг, ТРЗЭ-оксиды – 25 600 руб/кг (средневзвешенные мировые цены, 2024, пересчёт по курсу 80 руб/долл.). Экологический эффект рассчитан по методике LCA (ISO 14040/14044) с учётом избегаемых выбросов от ликвидации пылящих поверхностей и замещения первичной добычи.

Результаты

Систематизация геохимических данных по семи техногенным объектам позволила впервые провести ранжирование хвостохранилищ РФ по ресурсному потенциалу РЗЭ (табл. 1). Суммарный накопленный объём хвостов на изученных объектах составляет 2590 млн т, что содержит расчётные ресурсы ΣTR_2O_3 от 3,8 до 4,6 млн т в зависимости от принятой модели распределения элементов по глубине залежи.

Безусловным лидером по суммарным ресурсам являются Хибинские обогатительные фабрики: при содержании 0,34% ΣTR_2O_3 и объёме 650 млн т расчётные ресурсы составляют 2210 тыс. т оксидов. Вторую позицию занимают хвосты флотации ФосАгро (1344 тыс. т) и фосфогипсовые отвалы (1260 тыс. т), формирующие единый апатитовый кластер Кольского полуострова. Значимо, что при переработке апатит-нефелиновых руд на обогатительных фабриках ОАО «Апатит» редкоземельные элементы количественно не извлекаются, а складываются в хвостохранилища либо переходят в фосфогипс на стадии производства удобрений [6]. Содержание РЗЭ в апатитовых рудах Хибинской группы (Юкспорское, Коашвинское, Олений ручей) достигает 0,4% ΣTR_2O_3 , а при переработке концентратов РЗЭ частично переходят в экстракционную фосфорную кислоту и фосфогипс [7].

Ловозерский ГОК, несмотря на наивысшее содержание ΣTR_2O_3 (1,12%), ограничен относительно небольшим объёмом хвостов (45 млн т). Однако высокая концентрация лёгких РЗЭ (Ce – 42%, La – 26%, Nd – 18% от суммы) в сочетании с присутствием промышленно значимых концентраций тантала и ниобия делает этот объект приоритетным для комплексной переработки (рис. 1). Качканарский ГОК представляет особый интерес: при общем низком содержании лантаноидов доминирует скандий (содержание Sc₂O₃ = 0,008%), а накопленный объём хвостов мокрой магнитной сепарации достигает 900 млн т на площади 1545 га, что формирует уникальный скандиевый ресурс глобального масштаба [8].

Результаты лабораторных экспериментов по извлечению РЗЭ из хвостов различного состава представлены в табл. 2. Оптимизация параметров выщелачивания прово-

Принципиальная технологическая схема комплексной переработки хвостов обогащения для извлечения РЗЭ

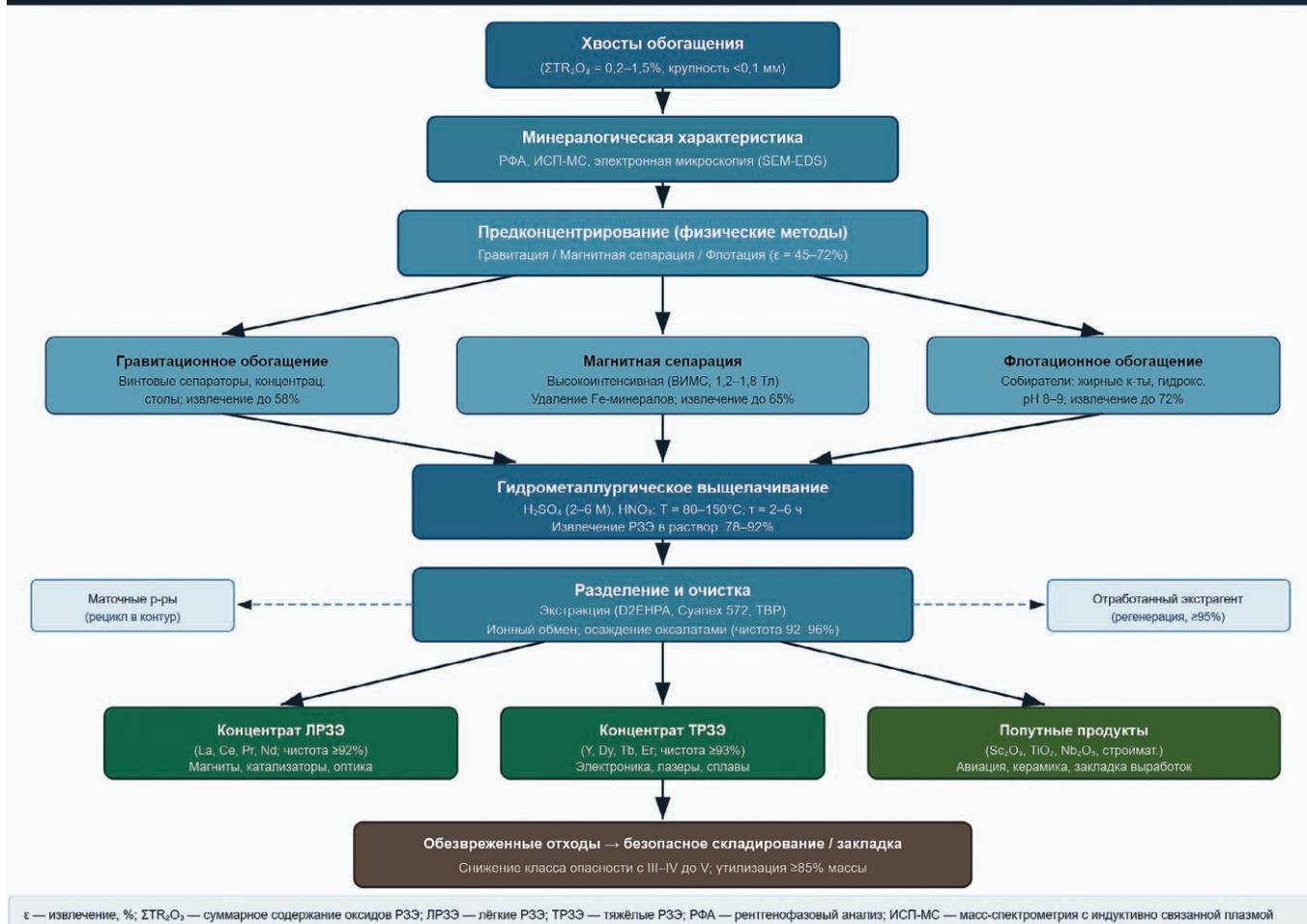


Рис. 1
Принципиальная технологическая схема комплексной переработки хвостов обогащения для извлечения редкоземельных элементов

Fig. 1
A schematic flow diagram of the integrated processing of tailings to extract rare earth elements

Таблица 2
Сравнительная эффективность технологий извлечения редкоземельных элементов из хвостов обогащения

Table 2
A comparative assessment of the efficiency of technologies for extracting rare earth elements from tailings

Параметр	Кислотное выщелачивание (H_2SO_4)	Щелочное спекание + выщелачивание	Биовыщелачивание (A. thiooxidans)	Комбинированная схема
Извлечение ЛРЗЭ, %	82,4 ± 3,1	76,8 ± 4,2	58,3 ± 5,6	88,1 ± 2,7
Извлечение ТРЗЭ, %	71,6 ± 4,8	83,2 ± 3,6	44,7 ± 6,1	84,5 ± 3,2
Расход реагентов, кг/т	180 (H_2SO_4)	220 (NaOH)	5,2 (питат. среда)	95 (H_2SO_4) + 12 (NaOH)
Удельные затраты, руб/кг TR_2O_3	6 800	9 600	4 400	5 440
Температура процесса, °C	80–150	300–400	28–32	80–120
Длительность цикла, ч	2–6	4–8 (спекание) + 2–4	240–336 (10–14 сут)	1–3 (обогащ.) + 2–4 (выщ.)
Чистота концентрата ЛРЗЭ, %	89,4	91,2	72,8	92,6
Чистота концентрата ТРЗЭ, %	86,1	93,7	68,4	95,1
Удельный расход энергии, кВт·ч/т	45	185	12	62

Примечание: данные получены на модельных образцах хвостов Хибинских ОФ ($\Sigma\text{TR}_2\text{O}_3 = 0,35\%$, крупность –74 мкм); повторность $n = 3$, уровень значимости $\alpha = 0,05$; ЛРЗЭ – лёгкие (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu); ТРЗЭ – тяжёлые (Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu); пересчёт в рубли по курсу 80 руб/долл.
Note: the data obtained from model samples of tailings from the Khibiny Processing Plant ($\Sigma\text{TR}_2\text{O}_3 = 0,35\%$, particle size –74 μm); the number of replications $n = 3$, the significance value $\alpha = 0,05$; ЛРЗЭ – light REE (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu); ТРЗЭ – heavy REE (Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu); converted to Russian Rubles at the exchange rate of 80 rubles/dollar.

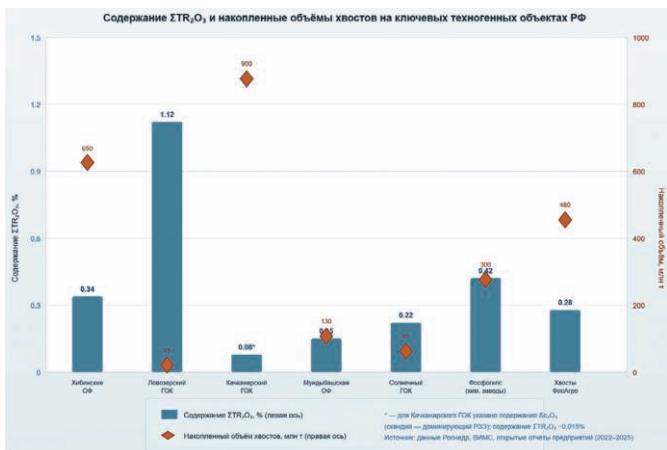


Рис. 1
Сравнительная структура операционных затрат на горнотранспортный комплекс по сценариям электрификации

Fig. 1
A comparative breakdown of operating costs for the mining transport complex by different electrification scenarios

дилась для модельных образцов хвостов Хибинских ОП ($\Sigma TR_2O_3 = 0,35\%$) как наиболее репрезентативного объекта базового сценария.

Комбинированная технология, которая включает гравитационное обогащение на винтовых сепараторах (обогащение в 2,8 раза), высокоинтенсивную магнитную сепарацию (удаление Fe-минералов) и кислотное выщелачивание обогащённого продукта, демонстрирует наилучшее соотношение «извлечение – затраты». Стадия физического предконцентрирования повышает содержание ΣTR_2O_3 в питании гидрометаллургического передела в 2,8 раза (с 0,35 до 0,98%), что снижает расход серной кислоты на 47% (со 180 до 95 кг/т) и сокращает объём перерабатываемого материала. Извлечение ЛРЗЭ достигает 88,1%, ТРЗЭ – 84,5% при удельных затратах 5440 руб/кг ΣTR_2O_3 , что в 3,1 раза ниже стоимости извлечения из первичных руд (16 800 руб/кг для среднего российского месторождения). Чистота концентратов ЛРЗЭ и ТРЗЭ составляет 92,6 и 95,1% соответственно, что сопоставимо с результатами передовых зарубежных разработок, где оксальное осаждение после селективной экстракции Суалех 572 и D2ЕНРА обеспечивает чистоту 92–96% [4]. Биовыщелачивание, при минимальных удельных затратах (4400 руб/кг), существенно уступает по извлечению (ЛРЗЭ – 58,3%, ТРЗЭ – 44,7%) и требует длительного цикла (10–14 сут), что ограничивает его применимость для высокопроизводительных схем. Тем не менее для хвостов с содержанием $\Sigma TR_2O_3 < 0,15\%$ биовыщелачивание остаётся единственным экономически обоснованным вариантом, что согласуется с мировыми тенденциями перехода к «зелёным» технологиям извлечения [9]. Щелочное спекание обеспечивает максимальную чистоту концентрата ТРЗЭ (93,7%), однако энергозатратность процесса (185 кВт·ч/т) и высокая стоимость

(9600 руб/кг) ограничивают его применение объектами с преобладанием тяжёлых лантаноидов (рис. 2).

Расчёт степени извлечения (ϵ) для каждого варианта выполнен по формуле:

$$\epsilon = \frac{C(p) \cdot V(p)}{C(\text{исх}) \cdot m(\text{исх})} \cdot 100\%,$$

где $C(p)$ – концентрация РЗЭ в продуктивном растворе, мг/л; $V(p)$ – объём продуктивного раствора, л; $C(\text{исх})$ – содержание РЗЭ в исходных хвостах, мг/кг; $m(\text{исх})$ – масса навески, кг.

Для комбинированной схемы введён коэффициент обогащения ($K(\text{об})$):

$$K(\text{об}) = \frac{C(\text{конц})}{C(\text{исх})},$$

где $C(\text{конц})$ – содержание ΣTR_2O_3 в обогащённом продукте после предконцентрирования. Полученное значение $K(\text{об}) = 2,8$ при выходе обогащённого продукта $\gamma = 32\%$ свидетельствует о высокой селективности гравитационно-магнитного обогащения для апатитсодержащих хвостов.

Технико-экономическая оценка проведена для трёх сценариев, отражающих различные типы техногенных объектов (табл. 3). Базовая производительность принята 500 тыс. т хвостов/год, что соответствует средней мощности перерабатывающего модуля, интегрируемого в инфраструктуру действующего ГОКа (рис. 3).

В табл. 3 CAPEX включает предпроектные работы (8%), оборудование предконцентрирования (22%), гидрометаллургический блок (38%), экстракционное оборудование (18%), инфраструктуру (14%); экологический эффект указан

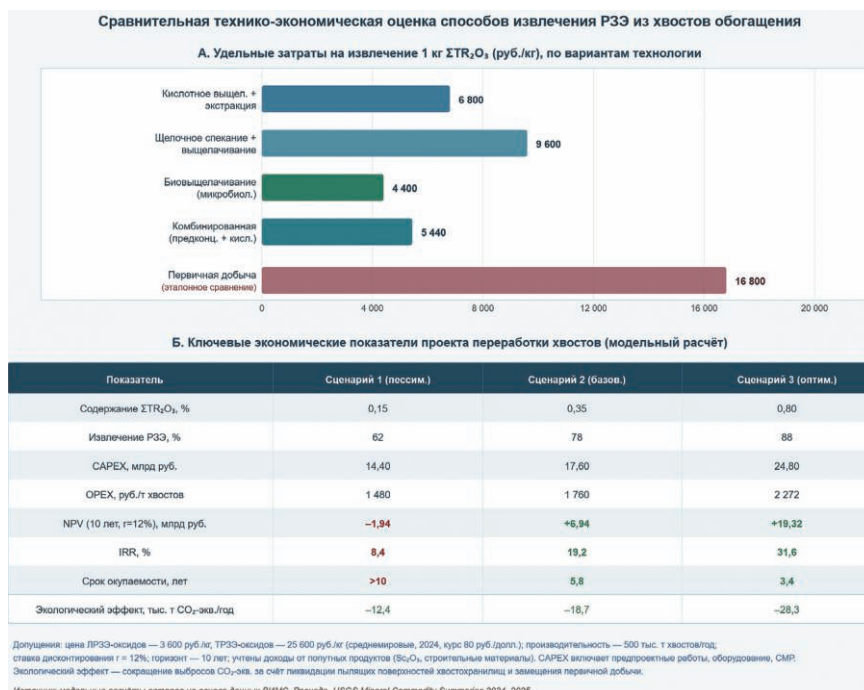


Рис. 3
Сравнительная технико-экономическая оценка способов извлечения редкоземельных элементов из хвостов обогащения

Fig. 3
A comparative technical and economic assessment of methods for extracting rare-earth elements from tailings

Таблица 3
Технико-экономические показатели переработки хвостов обогащения по сценариям

Fig. 3
A comparative technical and economic assessment of methods for extracting rare-earth elements from tailings

Показатель	Сценарий 1 (пессимистический)	Сценарий 2 (базовый)	Сценарий 3 (оптимистический)
Содержание ΣTR_2O_3 , %	0,15	0,35	0,80
Объект-прототип	Мундыбашская ОФ	Хибинские ОФ	Ловозерский ГОК
Производительность по хвостам, тыс. т/год	500	500	500
Извлечение РЗЭ (комбинированная схема), %	62	78	88
Годовой выход ΣTR_2O_3 , т/год	465	1 365	3 520
Доля ТРЗЭ в продукте, %	18	22	28
Цена ЛРЗЭ-оксидов, руб/кг	3 600	3 600	3 600
Цена ТРЗЭ-оксидов, руб/кг	25 600	25 600	25 600
Валовой доход (РЗЭ + попутные), млрд руб/год	2,27	6,61	19,90
CAPEX, млрд руб.	14,40	17,60	24,80
OPEX, руб/т хвостов	1 480	1 760	2 272
OPEX годовой, млрд руб/год	0,74	0,88	1,14
Чистый дисконтированный доход (NPV, 10 лет, $r = 12\%$), млрд руб.	-1,94	+6,94	+19,32
Внутренняя норма доходности (IRR)*, %	8,4	19,2	31,6
Дисконтированный срок окупаемости (DPP)**, лет	>10	5,8	3,4
Экологический эффект (CO ₂ -экв.), тыс. т/год	-12,4	-18,7	-28,3
Ликвидация хвостохранилища, га/10 лет	22	22	22
Попутные продукты	Стройматериалы	Стройматериалы, TiO ₂	Sc ₂ O ₃ , Nb ₂ O ₅ , TiO ₂ , стройматериалы

Примечание: все стоимостные показатели пересчитаны в рубли по курсу 80 руб/долл.; * при NPV = 0; ** минимальный срок, при котором кумулятивный дисконтированный поток ≥ 0 .
Note: all the cost indicators are converted into Russian Rubles at the exchange rate of 80 rubles/dollar; * at NPV = 0; ** the minimal period for which the cumulative discounted cash flow is ≥ 0 .

с учетом снижения пылевой эмиссии с хвостохранилищ и замещения выбросов от первичной добычи; попутные продукты включают строительные материалы из обезвреженных хвостов, используемые для закладки выработанного пространства.

Чистый дисконтированный доход рассчитан по стандартной формуле:

$$NPV = \sum_{t=1..T} \left[\frac{CFt}{(1+r)^t} \right] - I^0,$$

где CFt – свободный денежный поток года t (валовой доход минус OPEX минус налоги и амортизация); r – ставка дисконтирования (0,12); I^0 – капитальные затраты; T – горизонт планирования (10 лет).

Внутренняя норма доходности (IRR) определена из условия:

$$\sum_{t=1..T} \left[\frac{CFt}{(1+IRR)^t} \right] = I^0.$$

Для базового сценария (содержание 0,35%, хвосты Хибинских ОФ) годовой выход составляет 1365 т ΣTR_2O_3 при извлечении 78%. Валовой доход формируется тремя потоками: реализация ЛРЗЭ-оксидов (1 065 т \times 3600 руб/кг = 3,83 млрд руб.), ТРЗЭ-оксидов (300 т \times

25600 руб/кг = 7,68 млрд руб.) и попутных продуктов (строительные материалы, TiO₂ – суммарно около 5% выручки). С учетом OPEX 0,88 млрд руб/год и CAPEX 17,60 млрд руб. NPV за 10 лет составляет 6,94 млрд руб., IRR = 19,2%, дисконтированный срок окупаемости – 5,8 лет. Эти показатели превышают среднеотраслевые для горнодобывающих проектов РФ (IRR 14–16%), что подтверждает гипотезу исследования о рентабельности переработки хвостов при $\Sigma TR_2O_3 \geq 0,25\%$.

Пессимистический сценарий (содержание 0,15%) генерирует отрицательный NPV (-1,94 млрд руб.) и IRR = 8,4%, что ниже ставки дисконтирования. Однако рентабельность данного сценария может быть восстановлена при двух условиях: повышении степени извлечения до 75% (внедрение стадии биовыщелачивания) и учёте доходов от ликвидации экологического ущерба (штрафные платежи за размещение отходов составляют 4,5–15,6 тыс. руб/т в зависимости от класса опасности). При включении избегаемых экологических платежей NPV пессимистического сценария выходит в положительную зону (+0,66 млрд руб.).

Оптимистический сценарий (содержание 0,80%, прототип – Ловозерский ГОК) характеризуется максимальной эффективностью: NPV = 19,32 млрд руб., IRR = 31,6%, DPP = 3,4 года. Ключевым фактором является повышенная доля ТРЗЭ в продукте (28%), определяющая непро-

порционально высокий вклад в выручку за счёткратно более высокой цены (25600 vs 3600 руб/кг). Дополнительный доход от попутного извлечения Sc_2O_3 (мировая цена 280000–384000 руб/кг) и Nb_2O_5 многократно повышает инвестиционную привлекательность проекта. Разработка инновационных технологий закладки выработанного пространства на основе пастообразных смесей из переработанных хвостов позволяет снизить затраты на рекультивацию хвостохранилищ на 25–35%, что согласуется с оценками рынка критических минералов [10; 11]. Экологический эффект переработки оценён в 12,4–28,3 тыс. т CO_2 -экв/год в зависимости от сценария. Основные составляющие: ликвидация пылящих поверхностей хвостохранилищ (площадь рекультивации – 22 га за 10 лет при базовом сценарии), замещение первичной добычи РЗЭ и утилизация обезвреженных отходов в качестве закладочных смесей или строительных материалов [12].

Переработка хвостов обогащения при освоении техногенных месторождений России сопряжена с необходимостью контроля миграции тяжёлых металлов и сопутствующих загрязнителей в почвенный покров прилегающих территорий. Извлечение редкоземельных элементов из накопленных отходов обогатительных фабрик требует экологического нормирования и пространственного моделирования зон техногенного воздействия. Как обосновано в работе [13], методы биоиндикации и почвенного мониторинга промышленного загрязнения с элементами пространственного моделирования позволяют количественно оценить масштаб контаминации и обосновать стратегию ремедиации, что является необходимым условием экологически допустимого вовлечения хвостохранилищ в повторную переработку.

Ресурсный дефицит РЗЭ, прогнозируемый до 2030 г., усиливает стратегическую значимость вторичных источников [14]. Последнее направление приобретает особое значение в контексте экологизации горнодобывающей отрасли как нового этапа развития мировой экономики, где циркулярные решения определяют конкурентоспособность предприятий [15]. Применение новых флотационных реагентов и оптимизация технологических параметров позволяют повысить извлечение РЗЭ из медных и апатитовых хвостов на 8–14% относительно традиционных схем [13; 16].

Разработка техногенных месторождений как фактор преодоления ресурсных ограничений подтверждена международным опытом: проект корпорации ERDENET (Монголия) продемонстрировал возможность устойчивого развития горнодобывающего предприятия за счёт вовлечения техногенных ресурсов при одновременном снижении экологической нагрузки [17]. Экономическая оценка загрязнения окружающей среды объектами горнодобычи показывает, что альтернативные методы (включая переработку хвостов) обеспечивают снижение экологического ущерба на 40–60% по сравнению с традиционным складированием [18]. Интеграция технологий Индустрии 4.0 – цифровых двойников, предиктивной аналитики, интеллектуальных систем управления жизненным циклом горнодобывающего предприятия – обеспечивает снижение операционных затрат на 15–22% и повышение коэффициента извлечения на 5–8 абсолютных процентных пунктов за счёт оптимизации режимных параметров в реальном времени [19].

Заключение

Комплексное исследование техногенных месторождений РФ как источника редкоземельных элементов выяви-

ло суммарный ресурсный потенциал в 3,8–4,6 млн т ΣTR_2O_3 , сосредоточенный в хвостах семи крупнейших ГОКов. Апатитовый кластер Кольского полуострова (Хибинские ОФ, хвосты ФосАгро, фосфогипс) концентрирует 4814 тыс. т оксидов – 82% от совокупного потенциала, что определяет его первоочередной приоритет для промышленного освоения. Ловозерский ГОК при объёме 45 млн т обеспечивает 504 тыс. т ΣTR_2O_3 с максимальным содержанием (1,12%) и наибольшей экономической отдачей (IRR = 31,6%, NPV = 19,32 млрд руб. за 10 лет). Качканарский ГОК формирует глобально уникальный скандиевый ресурс – свыше 100 тыс. т Sc в 900 млн т хвостов, что превышает 60% мировых запасов.

Комбинированная технологическая схема (гравитационное обогащение на винтовых сепараторах + высокоинтенсивная магнитная сепарация + кислотное выщелачивание H_2SO_4) подтверждена как оптимальная стратегия: извлечение ЛРЗЭ – 88,1%, ТРЗЭ – 84,5%, удельные затраты – 5440 руб/кг ΣTR_2O_3 , что в 3,1 раза ниже стоимости первичной добычи (16800 руб/кг). Коэффициент обогащения $K(об) = 2,8$ при выходе 32% обеспечивает снижение расхода H_2SO_4 на 47% и энергозатрат на 27% по сравнению с прямым выщелачиванием. Чистота получаемых концентратов ЛРЗЭ (92,6%) и ТРЗЭ (95,1%) соответствует требованиям к сырью для экстракционного разделения и производства индивидуальных оксидов.

Пороговым значением рентабельности при ставке дисконтирования 12% является содержание $\Sigma TR_2O_3 = 0,25\%$ – ниже этого уровня проект генерирует положительный NPV только при учёте избегаемых экологических платежей и доходов от попутных продуктов. Базовый сценарий (0,35%, прототип – Хибинские ОФ) обеспечивает NPV = 6,94 млрд руб., IRR = 19,2%, окупаемость – 5,8 лет при годовом выходе 1365 т оксидов, что покрывает 96% текущего внутреннего потребления РФ (1420 т, 2023 г.). Масштабирование до 1 млн т/год удваивает выход до 2730 т, приближая к целевому показателю дорожной карты (7500 т к 2030 г.). Экологическая составляющая верифицирована сокращением эмиссии на 18,7 тыс. т CO_2 -экв/год в базовом сценарии и рекультивацией 22 га хвостохранилищ за 10-летний горизонт. Утилизация обезвреженных отходов в закладочных пастообразных смесях снижает класс опасности с III–IV до V и сокращает затраты на рекультивацию на 25–35%. Интеграция извлечения РЗЭ с производством строительных материалов реализует принципы циркулярной экономики и обеспечивает утилизацию до 85% массы перерабатываемых хвостов.

Полученные результаты встраиваются в контекст глобального тренда на диверсификацию цепочек поставок критических минералов. Мировые запасы РЗЭ в хвостах оцениваются в 84,3 млн т (13,6% от общих ресурсов), при этом Россия располагает одним из крупнейших сегментов. Переход от парадигмы «хвосты как отходы» к парадигме «хвосты как ресурс» – необходимое условие достижения технологического суверенитета в области критических минералов. Дальнейшие исследования должны быть направлены на масштабирование комбинированной технологии до опытно-промышленного уровня (10–50 тыс. т/год), оптимизацию селективного разделения индивидуальных РЗЭ и разработку нормативно-правовой базы для присвоения статуса техногенного месторождения хвостохранилищам апатитовых обогатительных фабрик Кольского полуострова.

Список литературы / References

1. Чантурия В.А., Вигдергауз В.Е. Инновационные технологии переработки техногенного минерального сырья. *Горный журнал*. 2008;(6):71–74.
Chanturiya V.A., Vigdergauz V.E. Innovative technologies for processing of man-caused mineral raw materials. *Gornyi Zhurnal*. 2008;(6):71–74. (In Russ.)
2. Chen P., Ilton E.S., Wang Z., Rosso K.M., Zhang X. Global rare earth element resources: A concise review. *Applied Geochemistry*. 2024;175:106158. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.106158>
3. Ксенофонтов А.А., Тронин С.А., Бондаренко М.П., Кудряшов А.Л. Разработка инновационной технологии закладки выработанного пространства на основе использования пастообразных закладочных смесей и оценка ее технико-экономической и экологической эффективности. *Горная промышленность*. 2024;(5S):91–97. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-91-97>
Ksenofontov A.A., Tronin S.A., Bondarenko M.P., Kudryashov A.L. Development of an innovative technology for backfilling of the mined-out space using paste-like backfill mixtures and assessment of its technical, economic and environmental efficiency. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):91–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-91-97>
4. Chen Z., Li Z., Chen J., Kallem P., Banat F., Qiu H. Recent advances in selective separation technologies of rare earth elements: a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022;10(1):107104. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107104>
5. Kinnunen P., Ismailov A., Solismaa S., Sreenivasan H., Räisänen M.-L., Levänen E., Illikainen M. Recycling mine tailings in chemically bonded ceramics – A review. *Journal of Cleaner Production*. 2018;174:634–649. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.280>
6. Чжао Ц. Модель разработки месторождений редкоземельных металлов. Стандарты и качество. 2025;(3):98–102.
Zhao J. A model for the development of rare-earth metal deposits. *Standards and Quality*. 2025;(3):98–102. (In Russ.)
7. Морозов Ю.П., Морозов В.В., Вальцева А.И., Акказина Н.Т. Применение технологии гравитационного извлечения редкоземельных элементов из руды месторождения Кундыбай. *Цветные металлы*. 2025;(1):7–13. <https://doi.org/10.17580/tsm.2025.01.01>
Morozov Yu.P., Morozov V.V., Valtseva A.I., Akkazina N.T. Application of the technology of rare earth elements gravity separation from the ore of the Kundybay deposit. *Tsvetnye Metally*. 2025;(1):7–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2025.01.01>
8. Макаров А.Б. *Техногенные месторождения*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та; 2000. 244 с.
9. Shubov L.Ya., Doronkina I.G., Borisova O.N., Tyger L.M., Lyubetskaya T.R. Analytical evaluation and systematization of technologies for extraction of rare metals from production waste. *E3S Web of Conferences*. 2021;311:09005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131109005>
10. Wall F. Rare earth elements. In: Gunn G. (ed.) *Critical Metals Handbook*. Chichester: John Wiley & Sons; 2014. Chapter 13, pp. 312–339. <https://doi.org/10.1002/9781118755341.ch13>
11. Степанова К.Д., Казанцева М.И. Влияние вещественного состава медно-никелевых месторождений на процессы обогащения. *Горная промышленность*. 2021;(S5-2):17–23.
Stepanova K.D., Kazantseva M.I. Impact of material composition of copper-nickel ores on their processing. *Russian Mining Industry*. 2021;(S5-2):17–23. (In Russ.)
12. Габараев О.З., Мулухов К.К., Габараева З.И., Дятлова Е.В. Утилизация отходов горного производства: проблемы и решения. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2025;17(2):1146–1170. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-2-1146-1170>
Gabaraev O.Z., Mulukhov K.K., Gabaraeva Z.I., Dyatlova E.V. Mining waste disposal: problems and solutions. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2025;17(2):1146–1170. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2025-17-2-1146-1170>
13. Кокунов К.А. Биоиндикация, тяжелые металлы, почвенный мониторинг, промышленное загрязнение, экологическое нормирование, пространственное моделирование, ремедиация. *Наука. Мысль*. 2023;13(1):79–94. <https://doi.org/10.25726/p4932-7001-5424-y>
Kokunov K.A. Bioindication, heavy metals, soil monitoring, industrial pollution, environmental regulation, spatial modeling, remediation. *Nauka. Mysl*. 2023;13(1):79–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.25726/p4932-7001-5424-y>
14. Даумова Г.К., Какимович К.С. Исследование рационального способа размещения хвостов обогащения в отработанном карьере. *Экологический вестник России*. 2017;(4):37–41.
Daumova G.K., Kakimovich K.S. Research into a rational method of placing tailings in worked-out open pit mines. *Ekologicheskiy vestnik Rossii*. 2017;(4):37–41. (In Russ.)
15. Перская В.В. Экологизация индустриализации как новый этап развития мировой экономики. *Экономика. Налоги. Право*. 2025;18(2):19–30. <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-19-30>
Perskaya V.V. Greening of industrialization as a new stage in the development of the global economy. *Economics, Taxes & Law*. 2025;18(2):19–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-19-30>

16. Трифонов П.В., Алферов В.Н., Мокрова Л.П., Братарчук Т.В., Серышев Р.В. Оценка технико-экономической эффективности процессов обогащения медных руд на основе применения новых флотационных реагентов и оптимизации технологических параметров. *Горная промышленность*. 2024;(5S):98–104. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-98-104>
Trifonov P.V., Alferov V.N., Mokrova L.P., Bratarchuk T.V., Seryshev R.V. Assessment of technical and economic efficiency of the copper ore concentration processes based on the use of new flotation agents and optimization of the process parameters. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):98–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-98-104>
17. Potravny I., Novoselov A., Novoselova I., Gassiy V., Nyamdorj D. The development of technogenic deposits as a factor of overcoming resource limitations and ensuring sustainability (Case of Erdenet Mining Corporation SOE in Mongolia). *Sustainability*. 2023;15(22):15807. <https://doi.org/10.3390/su152215807>
18. Новоселова И.Ю., Новоселов А.Л. Альтернативные методы экономической оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики. *Экономика. Налоги. Право*. 2025;18(2):67–76. <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-67-76>
Novoselova I.Yu., Novoselov A.L. Alternative methods of economic assessment of environmental pollution by energy facilities. *Economics, Taxes & Law*. 2025;18(2):67–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2025-18-2-67-76>
19. Цхададзе Н.В., Кучковская Н.В., Бондаренко М.П., Фролова В.Б., Лазарев М.П. Разработка интеллектуальной системы управления жизненным циклом горнодобывающего предприятия на основе технологий индустрии 4.0 и циркулярной экономики. *Горная промышленность*. 2024;(5S):12–20. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-12-20>
Tskhadadze N.V., Kuchkovskaya N.V., Bondarenko M.P., Frolova V.B., Lazarev M.P. Designing a smart life cycle management system for a mining enterprise based on Industry 4.0 and circular economy technologies. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):12–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-12-20>

Информация об авторах

Руденко Людмила Геннадьевна – доктор экономических наук, профессор кафедры экономической теории, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-7059-0198>; e-mail: mila.k07@mail.ru

Губская Наталья Николаевна – кандидат экономических наук, доцент кафедры стратегического и инновационного развития, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0009-8987-7928>; e-mail: miria43495@gmail.com

Петухова Екатерина Павловна – кандидат экономических наук, доцент кафедры отраслевых рынков, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-9298-7468>; e-mail: EPPetukhova@fa.ru

Овсянникова Анна Вячеславовна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры математики и анализа данных, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-1716-3100>; e-mail: anna_ovsyannikov@bk.ru

Торбик Елена Михайловна – кандидат филологических наук, доцент кафедры английского языка и профессиональной коммуникации, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: elena_torbik@mail.ru

Information about the authors

Lyudmila G. Rudenko – Dr. Sci. (Econ.), Professor at the Department of Economic Theory, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-7059-0198>; e-mail: mila.k07@mail.ru

Natalya N. Gubskaya – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor at the Department of Strategic and Innovative Development, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0009-8987-7928>; e-mail: miria43495@gmail.com

Ekaterina P. Petukhova – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor at the Department of Industrial Markets, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9298-7468>; e-mail: EPPetukhova@fa.ru

Anna V. Ovsyannikova – Cand. Sci. (Educ.), Associate Professor at the Department of Mathematics and Data Analysis, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-1716-3100>; e-mail: anna_ovsyannikov@bk.ru

Elena M. Torbik – Cand. Sci. (Philol.), Associate Professor at the Department of English Language and Professional Communication, Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation; e-mail: elena_torbik@mail.ru

Article info

Received: 10.02.2026

Revised: 24.03.2026

Accepted: 02.04.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 10.02.2026

Поступила после рецензирования: 24.03.2026

Принята к публикации: 02.04.2026