

ENVIRONMENT AND ECOLOGY

UDC 622.271:622.7:504.06

Arno V.V., Kolesnichenko E.P., Garifullina I.Yu., Remizov N.A. Assessment of the Potential for Technogenic Geo-Resource Formation from Beneficiation Waste and the Environmental Prospects of Their Secondary Processing

Оценка потенциала формирования техногенных георесурсов из отходов обогащения и экологические перспективы их вторичной переработки

Arno Veronika Vladimirovna

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan

Kolesnichenko Eva Pavlovna

Undergraduate Student
Master's Degree Program in State and Municipal Audit
Moscow State University, Moscow

Garifulina Irina Yurievna,

Ph.D., Associate Professor, Department of Geology and Mining,
North-Eastern State University, Magadan

Remizov Nikita Andreevich,

Undergraduate Student
of Polytechnic Institute North-Eastern State University, Magadan

Арно Вероника Владимировна
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Колесниченко Ева Павловна,
Студентка 3 курса

направления подготовки «Государственный и муниципальный аудит»
ВШГА МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Гарифулина Ирина Юрьевна,
Кандидат технических наук, доцент кафедры Геологии и горного дела ФГБОУ ВО Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан
Ремизов Никита Андреевич,
Студент 3 курса

Политехнический институт
ФГБОУ ВО «Северо-Восточный государственный университет

Abstract. *The paper examines theoretical and methodological approaches to assessing the potential for technogenic geo-resource formation from ore beneficiation waste and analyses the environmental prospects of their secondary processing. A system of indicators is proposed, including the assessment of the volume and mass of accumulated tailings, the content of target components and their technological recovery rate, which is used to calculate the mineral potential of technogenic deposits. An economic model is developed to determine the overall effect of waste processing, taking into account revenue from secondary resource sales, processing costs and savings on environmental payments and land reclamation. The results show*

that under favourable technological and market conditions, secondary processing of beneficiation waste not only expands the mineral resource base but also significantly reduces environmental pressure by decreasing waste accumulation volumes and neutralising hazardous properties.

Keywords: *technogenic geo-resources, technogenic deposits, beneficiation waste, tailings, secondary processing, mineral potential, economic assessment, environmental effect, circular economy.*

Аннотация. *В статье рассматриваются теоретические и методические подходы к оценке потенциала формирования техногенных георесурсов из отходов обогащения руд и анализируются экологические перспективы их вторичной переработки. Предложена система показателей, включающая оценку объёма и массы накопленных хвостов, содержания целевых компонентов и коэффициента их технологического извлечения, на основе которой рассчитывается минеральный потенциал техногенных месторождений. Разработана экономическая модель, позволяющая определить совокупный эффект от переработки отходов с учётом выручки от реализации вторичных ресурсов, затрат на переработку и экономии на экологических платежах и рекультивации территорий. Показано, что при благоприятных технологических и рыночных условиях вторичная переработка отходов обогащения обеспечивает не только расширение минерально-сырьевой базы, но и значительное снижение экологической нагрузки за счёт уменьшения объёмов накопления отходов и нейтрализации их опасных свойств.*

Ключевые слова: *техногенные георесурсы, техногенные месторождения, отходы обогащения, хвосты, вторичная переработка, минеральный потенциал, экономическая оценка, экологический эффект, экономика замкнутого цикла.*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Введение

Рост потребности в металлах и минеральном сырье на фоне истощения традиционных месторождений делает актуальным вовлечение в эксплуатацию техногенных ресурсов, сформированных в результате длительной эксплуатации горнодобывающих и перерабатывающих предприятий. К таким ресурсам относятся техногенные месторождения и техногенные георесурсы, представленные отвальными породами, шлаками, шламами и, особенно, хвостами обогащения.[1-3]

Исследования показывают, что хвосты обогащения часто содержат значительные остаточные количества ценных компонентов, включая цветные и редкоземельные металлы, а также обладают физико-химическими свойствами, позволяющими использовать их как вторичное сырьё для производства строительных материалов и других продуктов. Вместе с тем длительное хранение хвостов в хвостохранилищах формирует долгосрочные экологические риски, связанные с загрязнением поверхностных и подземных вод, формированием пылевого загрязнения и деградацией земель.[3-4]

Цель работы – оценить потенциал формирования техногенных георесурсов из отходов обогащения и проанализировать экологические перспективы их вторичной переработки в контексте расширения минерально-сырьевой базы и снижения техногенной нагрузки на окружающую среду.

Методы

Теоретико-методологическая основа

Методологической основой исследования служат работы по техногенным месторождениям минерального сырья, техногенным вторичным ресурсам и концепции утилизации техногенных и металло-содержащих отходов. В частности, техногенные месторождения определяются как скопления техногенных образований, сформировавшиеся в результате складирования отходов добычи и переработки полезных ископаемых, с содержанием ценных компонентов, достаточным для экономически целесообразного извлечения.[3-4]

В основу оценки потенциала заложены принципы:

- комплексного использования минерального сырья, включая техногенные вторичные ресурсы;
- безотходных и малоотходных технологий;
- учёта полной экологической стоимости хранения и переработки техногенных образований.[4, 6-7]

Объект и информационная база

Объектом исследования являются отходы обогащения (хвосты) руд чёрных, цветных и редкометалльных металлов, накапливаемые в хвостохранилищах горнопромышленных предприятий. Информационная база включает:

- обзоры техногенных и вторичных золото- и металло-содержащих ресурсов.
- публикации по экологическим аспектам хранения хвостов обогащения.
- работы по техногенным месторождениям и техногенным вторичным ресурсам.
- исследования состава и свойств хвостов обогащения и возможностей их комплексной переработки.

Система показателей и расчётные зависимости

Для оценки потенциала техногенных георесурсов из хвостов обогащения используется следующая система показателей:

- объём накопленных хвостов V_t , м³;
- средняя плотность хвостов ρ_t , т/м³;
- масса хвостов M_t , т;
- среднее содержание целевых компонентов C_i (в долях единицы);
- коэффициент технологического извлечения η_i ;
- потенциально извлекаемый ресурс Q_i , т;
- стоимость ресурса R_i , руб.;
- интегральный показатель экологической опасности E_{ec} .

Масса хвостов определяется по формуле:

$$M_t = V_t \cdot \rho_t$$

Потенциально извлекаемый объём *i*-го компонента:

$$Q_i = M_t \cdot C_i \cdot \eta_i$$

При известной цене компонента P_i (руб./т) потенциальная выручка:

$$R_i = Q_i \cdot P_i$$

Экономический эффект переработки хвостов в год для всех компонентов:

$$E_{econ} = \sum_i R_i - C_{proc}$$

где C_{proc} – совокупные затраты на переработку (подготовка, переработка, реагенты, энергия, логистика).

Экологический эффект можно представить как:

$$E_{ecol} = C_{stor} + C_{rec} + C_{env}$$

где C_{stor} – затраты, избегаемые за счёт сокращения объёма хранения хвостов, C_{rec} – экономия на рекультивации, C_{env} – предотвращённые расходы (ущерб) от загрязнения окружающей среды.

Интегральный эффект переработки:

$$E_{tot} = E_{econ} + E_{ecol}$$

Результаты

Оценка минерального потенциала (пример расчёта)

Рассмотрим условный пример хвостохранилища обогатительной фабрики, сформированного за годы работы предприятия:

- объём хвостов $V_t = 8 \cdot 10^6 \text{ м}^3$;
- средняя плотность $\rho_t = 1,6 \text{ т/м}^3$;
- масса хвостов $M_t = 12,8 \cdot 10^6 \text{ т}$;
- среднее содержание меди $C_{Cu} = 0,25\% = 0,0025$;
- коэффициент извлечения меди $\eta_{Cu} = 0,6$;
- средняя цена меди $P_{Cu} = 800,000 \text{ руб./т}$ (условно);
- содержание сопутствующего компонента (например, молибдена) $C_{Mo} = 0,03\% = 0,0003$;
- коэффициент извлечения молибдена $\eta_{Mo} = 0,5$;
- цена молибдена $P_{Mo} = 3,000,000 \text{ руб./т}$ (условно).

Потенциал по меди:

- $Q_{Cu} = 12,8 \cdot 10^6 \cdot 0,0025 \cdot 0,6 = 19,200 \text{ т}$
- $R_{Cu} = 19,200 \cdot 800,000 = 15,36 \cdot 10^9 \text{ руб.}$

Потенциал по молибдену:

$$Q_{Mo} = 12,8 \cdot 10^6 \cdot 0,0003 \cdot 0,5 = 1,920 \text{ т}$$

$$R_{Mo} = 1,920 \cdot 3,000,000 = 5,76 \cdot 10^9 \text{ руб.}$$

Суммарная потенциальная выручка:

$$\sum_i R_i = 21,12 \cdot 10^9 \text{ руб.}$$

Допустим, совокупные затраты на переработку $C_{proc} = 14,0 \cdot 10^9$ руб., а экологический эффект (экономия на хранении, рекультивации и предотвращённом ущербе) оценивается в $E_{ecol} = 3,0 \cdot 10^9$ руб.

Тогда:

$$E_{econ} = 21,12 \cdot 10^9 - 14,0 \cdot 10^9 = 7,12 \cdot 10^9 \text{ руб.}$$

$$E_{tot} = 7,12 \cdot 10^9 + 3,0 \cdot 10^9 = 10,12 \cdot 10^9 \text{ руб.}$$

Это показывает, что при заданных параметрах переработка хвостов может обеспечить значительный совокупный эффект, сопоставимый с разработкой средних по запасам месторождений.[5-7]

Таблица 1.

Показатели потенциала и экологических эффектов (пример)

Показатель	Значение
Объём хвостов, V_t , млн м ³	8
Масса хвостов, M_t , млн т	12,8
Извлекаемая медь, Q_{Cu} , тыс. т	19,2
Извлекаемый молибден, Q_{Mo} , тыс. т	1,92
Потенциальная выручка, млрд руб.	21,12
Затраты на переработку, млрд руб.	14,0
Экологический эффект, млрд руб.	3,0
Интегральный эффект E_{tot} , млрд руб.	10,12

Экологические перспективы вторичной переработки

Снижение экологической опасности хранения хвостов

Хранение хвостов обогащения в хвостохранилищах сопровождается рисками загрязнения водных объектов, пылевыведения, нарушения ландшафтов и формирования техногенных геохимических аномалий. Экологические исследования показывают, что хвосты обогащения, особенно в горных регионах, создают специфические условия техногенного влияния на окружающую среду, требующие комплексной оценки и модернизации технологических процессов.[6-8]

Модернизация обогатительных процессов с включением стадий доизвлечения металлов и глубокой переработки хвостов позволяет не только использовать ранее потерянные компоненты, но и снижать токсичность и объём техногенных отложений, уменьшая нагрузку на экосистемы прилегающих территорий.[4-6]

Комплексная переработка и геоэкологический эффект.

Проекты комплексной переработки хвостов, реализуемые для хвостов лопаритовых и других редкометалльных руд, демонстрируют возможность получения нескольких видов кондиционных концентратов (лопаритового, нефелинового, полевошпатового, эгиринового и др.) при одновременном снижении техногенной нагрузки на окружающую среду. Комплексные технологии предполагают адаптацию флотационных и других методов обогащения к специфике техногенного сырья, учитывая вещественный состав, возраст и условия хранения хвостов.

Геоэкологический эффект включает:

- снижение загрязнения атмосферы (пылеподавление, консервация поверхностей хвостохранилищ);

- уменьшение инфильтрации загрязняющих веществ в грунтовые воды;

- возможность рекультивации и биологического восстановления техногенных ландшафтов.

Исследования микробиологического потенциала техногенных грунтов показывают, что при определённых условиях возможно формирование почвенного покрова и развитие растительности, что открывает перспективы природоподобной рекультивации и биоремедиации хвостохранилищ.[4]

Обсуждение

Рассмотренный подход к оценке потенциала техногенных георесурсов подтверждает выводы о том, что техногенные отходы являются важным резервом пополнения и укрепления минерально-сырьевой базы, особенно для цветной и редкометалльной металлургии. При этом хвосты обогащения часто более удобны для утилизации, чем отвалы вскрышных и вмещающих пород, поскольку они представляют собой уже дроблёный и относительно однородный материал.

Однако экономическая реализуемость проектов вторичной переработки сильно зависит от цен на металлы, масштабов хвостохранилищ, доступности технологий и инфраструктуры, а также от регуляторной среды и систем экологических платежей. В ряде случаев переработка хвостов может оказаться рентабельной только при учёте предотвращённого экологического ущерба и возможной государственной поддержки, что настоятельно подчёркивается в работах по концепции утилизации техногенных и металло-содержащих отходов.

Ключевым ограничением остаётся разнородность техногенного сырья, изменчивость вещественного состава в пространстве и времени, а также наличие опасных компонентов, требующих технологических решений, гарантирующих снижение токсичности конечных продуктов и остаточных материалов. Это требует разработки

комплексных схем переработки с учётом геоэкологических аспектов и оценки полного жизненного цикла продуктов и отходов.

Выводы

Техногенные георесурсы, сформированные из отходов обогащения, представляют собой значимый резерв расширения минерально-сырьевой базы, особенно в условиях роста спроса на цветные и редкоземельные металлы и истощения традиционных месторождений.

Предложенная система показателей и расчётных зависимостей позволяет количественно оценить минеральный потенциал хвостов обогащения и интегральный эффект их переработки, включающий как экономическую, так и экологическую составляющие.

Экологические перспективы вторичной переработки хвостов связаны с возможностью снижения токсичности и объёма техногенных отложений, уменьшения загрязнения вод и атмосферы, а также рекультивации техногенных ландшафтов при условии применения комплексных технологических схем и учёта геоэкологических факторов.

Реализация потенциала техногенных георесурсов требует интеграции усилий горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, научных организаций и государства для разработки и внедрения технологических решений, учитывающих экономические, экологические и социальные аспекты устойчивого развития.

References

1. Рыльникова, М. В. Классификация техногенных георесурсов в свете перспектив комплексного освоения рудных месторождений / М. В. Рыльникова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М. : Горная книга, 2012. – № 2. – С. 43–48.
2. Трубецкой, К. Н. Эффективные технологии использования техногенных георесурсов – основа экологической безопасности освоения недр / К. Н. Трубецкой, В. Н. Захаров, Д. Р. Каплунов, М. В. Рыльникова // Горный журнал. – М. : Изд-во «Горная промышленность», 2016. – № 5. – С. 20–28. – DOI: 10.17580/gzh.2016.05.03.
3. Нуреев, Р. Р. Оценка воздействия отходов обогащения медных руд на поверхностные и подземные воды / Р. Р. Нуреев, М. А. Пашкевич, П. А. Харько // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12, № 4. – С. 169–179. – DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013.
4. Гончар Н.В., Пикалов В.А., Соколовский А.В., Терешина М.А. Экологосбалансированная геотехнология освоения природных и техногенных

георесурсов. Горная промышленность. 2024;(4):68–73. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-68-73>

5. Перспективы переработки техногенных отходов и техногенных месторождений в РФ [Электронный ресурс] / ЗолотеХ. – М. : ЗолотеХ, 2026. – 6 мая. – Режим доступа: https://zolteh.ru/technology_equipment/perspektivy_pererabotki_tekhnogennykh_otkhodov_i_tekhnogennykh_mestorozhdeniy_v_rf/ (дата обращения: 20.05.2026).

6. Техногенные месторождения [Электронный ресурс] // Neftegaz.RU. – М. : Медиа-группа Neftegaz.RU, 2014. – Режим доступа: <https://neftegaz.ru/tech-library/mestorozhdeniya/142159-tekhnogennye-mestorozhdeniya/> (дата обращения: 20.05.2026).

7. Вадулина, Н. В. Разработка способа утилизации отходов горно-обогатительных комбинатов созданием активных фильтрующих обезжелезивающих материалов / Н. В. Вадулина, Н. Х. Абдрахманов, А. В. Федосов, И. И. Бадртдинова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329, № 11. – С. 37–43.

8. Рубанов, Ю. К. Перспективы переработки горнопромышленных отходов в контексте устойчивого развития экономики / Ю. К. Рубанов, В. И. Михнев, К. Ли, Ю. С. Кузнецова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2025. – Вып. 3. – С. 17–23.