

УДК 553.07

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-144-152

ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Алексей Андреевич Самсонов^{1✉}, Дмитрий Михайлович Коршунов²,
Виктор Иванович Старостин³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; samsonov@geol.msu.ru[✉], <https://orcid.org/0009-0007-4637-0399>

² Геологический институт РАН, Москва, Россия; dmit0korsh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8500-7193>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; star@geol.msu.ru

Аннотация. Техногенные образования, сформировавшиеся в результате добычи и переработки твердых полезных ископаемых, представляют собой не просто отходы, а новый класс динамичных геологических тел. В работе обоснована необходимость применения к ним комплексного литологического подхода, аналогичного изучению природных формаций, для прогнозирования их эволюции и оценки потенциала вторичного использования. На конкретных примерах предложена концепция экзогенно-техногенных металлогенических провинций (Кольская, Уральская, Курская), отражающая пространственную приуроченность и специализацию антропогенных скоплений минерального сырья. Результаты исследования доказывают, что техногенные месторождения являются активными компонентами геологической среды, а их изучение требует развития нового направления — антропогенного литогенеза.

Ключевые слова: техногенные образования, хвостохранилища, отходы недропользования, гипергенез, геохимия, классификация, металлогения

Для цитирования: Самсонов А.А., Коршунов Д.М., Старостин В.И. Проблемы изучения и классификации твердых полезных ископаемых техногенных образований // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 144–152.

PROBLEMS OF STUDYING AND CLASSIFYING OF MINERAL RESOURCES IN TECHNOGENIC FORMATIONS

Aleksey A. Samsonov^{1✉}, Dmitriy M. Korshunov², Viktor I. Starostin³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; samsonov@geol.msu.ru[✉], <https://orcid.org/0009-0007-4637-0399>

² Geological institute RAS, Moscow, Russia; dmit0korsh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8500-7193>

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; star@geol.msu.ru

Abstract. Technogenic formations resulting from the extraction and processing of solid mineral resources are not merely waste, but constitute a new class of dynamic geological bodies. This paper substantiates the necessity of applying a comprehensive lithological approach to them, analogous to the study of natural formations, for forecasting their evolution and assessing the potential for secondary use. Using specific examples, the concept of exogenic-technogenic metallogenic provinces (e.g., Kola, Ural, Kursk) is proposed, reflecting the spatial localization and specialization of anthropogenic accumulations of mineral raw materials. The research results demonstrate that anthropogenic deposits are active components of the geological environment, and their study necessitates the development of a new scientific field — anthropogenic lithogenesis.

Keywords: technogenic formations, tailings storage facilities, mining waste, supergene, geochemistry, classification, metallogeny

For citation: Samsonov A.A., Korshunov D.M., Starostin V.I. Problems of studying and classifying of mineral resources in technogenic formations. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 144–152. (In Russ.).

Введение. В современной литературе под термином «техногенные образования» понимают все результаты изменения литосферы, связанные с человеческой деятельностью, будь то затопленные зоны перед гидроэлектростанциями, полигоны твердых бытовых отходов, города и даже асфальтовые дороги [Трофимов и др., 1995; Ford et al., 2014]. В данной работе рассматриваются техногенные образования, представленные отходами добычи и первичной переработки минерального сырья, а также отходами

энергетической и металлургической отраслей, как накопленные в исторический период, так и формируемые в настоящее время (рис. 1).

Добыча полезных ископаемых — одно из древнейших направлений деятельности человечества, уходящее корнями в эпоху неолита. Уже около 40 000 лет назад люди добывали кремль для орудий, а к IV–III тысячелетиям до н. э. появились первые медные и золотые рудники (например, в Месопотамии и на Балканах). В античности масштабы добычи

возросли: римляне разрабатывали серебряные месторождения в Испании, свинцовые — в Британии, создавая примитивные отвалы пустой породы. Однако до промышленной революции XVIII–XIX вв. объемы добычи оставались сравнительно малы, а воздействие на геологическую среду — локальным.

Резкий перелом произошел в XX в. с развитием технологий, ростом населения и потребностей промышленности. Если в 1900 г. мировая добыча угля составляла около 700 млн т, то к 2000 г. она превысила 5 млрд т. Аналогичный рост наблюдался и для металлов: производство железа за век увеличилось более чем в 30 раз, алюминия — в тысячи раз. Этот беспрецедентный рост, обусловленный потребностями индустриализации и мировых войн, привел к формированию глобальной сети антропогенных накоплений, сопоставимых по масштабам с природными геологическими телами. Например, только в угольной промышленности СССР к 1980-м годам накопилось свыше 25 млрд т отходов, а современные хвостохранилища разных типов добычи могут занимать десятки квадратных километров [Старостин, Самсонов 2023]. Скорость отработки крупных объектов такова, что за 30–40 лет техногенные отходы недропользования увеличиваются по своей площади минимум в несколько раз. Так, например, суммарная площадь, занимаемая отвалами и хвостохранилищами Ковдорского горно-обогатительного комбината с 1986 г. по настоящее время увеличилась в 3,5 раза [Чуриков и др., 2023].

В отличие от коренных рудных месторождений, формирующихся в разных геодинамических обстановках, техногенные скопления твердых полезных ископаемых всегда формируются на поверхности — в зоне активного воздействия экзогенных процессов. Они подвержены влиянию атмосферных факторов (осадки, ветер, перепады температур), которые вызывают физическое выветривание и эрозию; гидрологическим процессам (поверхностный сток, фильтрация, подтопление), что способствует выносу тонкодисперсного материала, гравитационному перераспределению вещества, миграции растворенных компонентов и биогенным факторам (микроорганизмы, растения), которые ускоряют химическое преобразование вещества.

В результате эти антропогенные образования, с одной стороны, аналогичны континентальным осадкам (аллювию, элювию), но с другой — отличаются от них неестественно высокой скоростью формирования, и часто аномальным химическим составом. Это делает их уникальными объектами для изучения с позиций гипергенеза, геологии полезных ископаемых, инженерной геологии и геоэкологии, а также требует разработки специальных подходов к их классификации и моделированию эволюции.

Основная цель данной работы — представить широкому кругу исследователей современные проблемы изучения и классификации твердых полезных ископаемых техногенных образований и показать

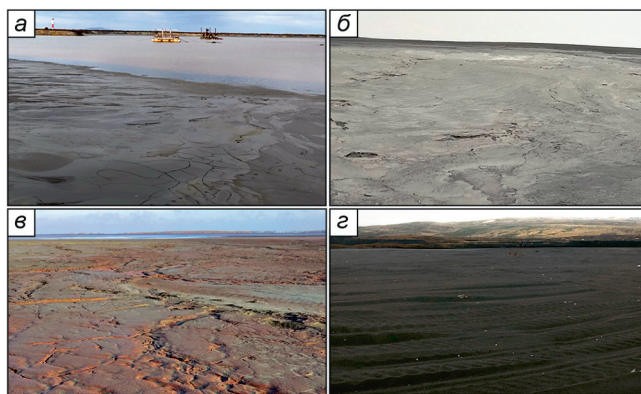


Рис. 1. Панорамные фотографии техногенных образований минерального сырья различных типов: а — хвостохранилище Новоучалинского месторождения (Южный Урал); б — хвостохранилище Ловозёрского месторождения (Кольский п-ов); в — хвостохранилище Михайловского месторождения (КМА); г — шламовые отвалы ГМК «Печенганикель» (Кольский п-ов)

авторский взгляд на пути их решения. Статья является приглашением к дискуссии по актуальной для современного мира тематике — методическим подходам к изучению и оценке техногенных месторождений.

Факторы преобразования техногенных геологических тел. Техногенные образования, а именно отходы недропользования и металлургического комплекса — вскрышные породы, хвосты переработки, шлаки — будучи локализованы в зоне активного гипергенеза, подвергаются воздействию тех же экзогенных факторов, что и природные осадочные породы. Как подчеркивал Н.М. Страхов [1963], скорость и направленность выветривания определяются триадой «климат-состав-гидродинамика», что особенно актуально для техногенных геологических тел.

1. *Физическое разрушение.* Температурное выветривание — рыхлые отвалы с низкой сортировкой материала (например, вскрышные породы угольных месторождений) быстро растрескиваются при циклах заморозания-оттаивания. Эоловый перенос — тонкодисперсные хвосты обогащения дают пылевые выбросы, это механизм, описанный Н.М. Страховым для аридных зон, но в техногенных условиях работающий в 10–100 раз быстрее. Например, пылевое загрязнение от переработки апатит-нефелиновых руд Мурманской области составляет 693 т в год. А нарушения ПДК пыли в воздухе зафиксированы на расстоянии более 75 км вокруг хвостохранилищ [Амосов и др., 2023].

2. *Химическое преобразование.* Окисление сульфидов формирует зоны в отвалах горных пород аналогичные зонам окисления кор выветривания рудных месторождений, но с лавинной динамикой из-за отсутствия природных буферов, таких как глинистые прослои и карбонаты [Donald et al., 1993.; Nordstrom et al. 1999.; Бортникова и др., 2006]. Также, например, техногенные карбонатные отходы (флюсовых доломитовых и магнезитовых

Таблица 1

Сравнительная характеристика процессов преобразования кор выветривания и техногенных образований

Критерий	Природные коры выветривания по [Разумова и др., 1963; Фролов, 1980]	Техногенные образования по [Lottermoser, 2022; Трофимов, 2023]
Время формирования	$10^3 - 10^6$ лет	$10 - 10^2$ лет
Скорость окисления (на примере сульфидов)	$10^{-6} - 10^{-5}$ м/год	$10^{-3} - 10^{-2}$ м/год

месторождений) разрушаются до 30% за 10–20 лет из-за высокой дисперсности материала [Касимов, Перельман, 1999].

3. *Гидрогенная миграция.* Техногенные геологические тела, в отличие от природных, часто лишены зональной фильтрации. Вертикальная инфильтрация преобладает над боковой, формируя «столбы выщелачивания». Резкий контраст гранулометрического состава во флотационных хвостах создает аномальные капиллярные эффекты, ускоряющие перенос растворов [Касимов, Перельман, 1999; Lottermoser, 2010].

Таким образом, техногенные образования представляют собой активно эволюционирующие системы, в которых процессы выветривания протекают на порядки быстрее, чем в классических корах выветривания (табл. 1). Если природные коры формируются тысячелетиями, постепенно достигая равновесия с окружающей средой [Разумова и др., 1963], то техногенные аналоги могут уже через 10–30 лет демонстрировать признаки глубокого преобразования. В отличие от плавных геохимических профилей латеритов или гидрослюдистых кор, в отвалах наблюдаются резкие контрасты: например, окисленные сульфидные зоны могут соседствовать с неизмененным материалом всего в нескольких сантиметрах.

Интенсивность и характер преобразования техногенных тел напрямую зависят от климатических условий. Во влажных тропиках и субтропиках (например, отвалы бокситовых рудников в Гвинее или никелевые хвосты обогащения Новой Каледонии) доминирует химическое выветривание с быстрым выносом растворимых компонентов [Plumlee, 2023]. Формируются аналоги латеритных кор — железистые и алюминиевые корки, но с аномально высоким содержанием хрома и никеля.

В аридных и семиаридных регионах (медьсодержащие отвалы месторождений Чили, хвосты обогащения золоторудных месторождений Австралии) преобладает физическое разрушение (термокластика, эоловая дефляция). Солевые коры (гипс, галит) образуются за 5–10 лет вместо столетий в природных условиях, а пылевые бури разносят накопленный материал на сотни километров, приводя к обширному загрязнению [Lottermoser, 2010; Dold, 2014].

В умеренном и холодном климате (отвалы угольных месторождений Кузбасса, сульфидные хвосты обогащения и отвалы шлаков переработки руд месторождений Кольского полуострова) циклы замерзания-оттаивания приводят к быстрому растрескиванию материала [Архипов, Решетняк, 2017]. Кислотный дренаж развивается медленнее, чем в тропиках, но действует дольше из-за замедленной нейтрализации. В зоне вечной мерзлоты формируются «законсервированные» техногенные геологические тела с замедленной, но не остановленной динамикой.

Помимо того, что техногенные образования подвержены всем тем же агентам преобразования, что и прочие континентальные осадки, они сами оказывают значительное влияние на окружающие их породы, формируя вместе с ними единую динамическую систему. Это взаимодействие проявляется через комплекс физико-механических, геохимических и термодинамических процессов, имеющих существенное значение для понимания их эволюции [Lottermoser, 2022].

Вскрышные горные породы оказывают значительное физическое воздействие на геологическую среду. Масса крупных отвалов горных пород создает нагрузку на подстилающие породы, вызывая их проседание и уплотнение. Особенно ярко это проявляется в районах с глинистыми толщами. Одновременно происходит изменение гидродинамического режима — создание искусственного фильтрационного напора приводит к подтоплению коренных пород и перераспределению грунтовых вод [Гальперин и др., 2012; Шерстюк, 2014].

Геохимическое взаимодействие на окружающую среду проявляется особенно интенсивно. Кислые или щелочные растворы, фильтрующиеся из отвалов, вызывают глубокое преобразование подстилающих пород [Dold, 2016]. В случае сульфидных отвалов кислотные дренажи приводят к окислению пирита во вмещающих сланцах с образованием серной кислоты, которая активно мигрирует. Тогда как карбонатные отвалы могут вызывать вторичную карбонатизацию песчаников. На контакте «отвал-порода» формируются специфические геохимические барьеры, где возникают новые минеральные ассоциации [Acharya, Kharel, 2020].

С геологической точки зрения эти процессы похожи по-своему проявлению на контактный метаморфизм и вместе с тем на классическое выветривание, но с уникальными особенностями: локальным проявлением, аномально высокой скоростью протекания и специфическими термодинамическими условиями.

По вышеназванным причинам, техногенные образования следует рассматривать не как изолированные образования, а как активные геологические системы, оказывающие преобразующее воздействие на окружающую геологическую среду. Техногенные горные породы представляют собой принципиально новый тип геологических тел, формирующийся не

по естественным литогенетическим циклам, а в результате направленной хозяйственной деятельности человека. Однако их последующая трансформация и взаимодействие с окружающими породами полностью подчиняется законам гипергенеза. Эти горные породы — не просто отходы хозяйственной деятельности человека, а новый класс поверхностных геологических формаций.

Следовательно, такой подход, с одной стороны, позволяет и даже требует использовать традиционные литологические методы исследования, такие как анализ минерального и химического состава, определение стадийности выветривания (через геохимические или минералогические критерии), изучение процессов денудации и аккумуляции (аналог фациально-литологического анализа), определение морфологии зон изменения и новообразованных реакционных зон взаимодействия с вмещающими (подстилающими) породами. С другой стороны, требуется разработка совершенно новых подходов: специальных методов картирования, геолого-экономической и экологической оценки твердых полезных ископаемых техногенных образований, адаптации учений о фациях и формациях. Всё вышесказанное создает основание для развития нового раздела геологии — антропогенного литогенеза, изучающего формирование и эволюцию искусственных геологических формаций.

К вопросу о классификациях. К настоящему времени уже множество исследований посвящено анализу экологических и экономических аспектов накопления и природного изменения отходов недропользования — хвостов обогащения и отвалов [Lottermoser, 2010; Архипов, Решетняк, 2017; Ford et al., 2014; Jamieson et al., 2015 и др.]. Этими и другими исследователями предлагались различные методы и интерпретационные приемы в попытках классифицировать все накопленные отходы добычи и первичной переработки минерального сырья, отходов энергетической и металлургической отраслей.

Системы классификаций предлагались самые различные. Наиболее полная работа, посвященная литологическому анализу таких отложений — это работа Дж.Р. Форда [Ford et al., 2014], предлагающая полноценный механизм описания «антропогенных слоев». Хотя Дж.Р. Форд [2014] предложил детальную литостратиграфическую модель всех типов антропогенных отложений и методы их исследований, его подход не учитывает ключевые особенности техногенных образований — специфический минеральный и химический составы, взрывную в геологическом масштабе времени геохимическую трансформацию и искусственную дисперсность.

Одна из наиболее удачных систем описания в этом направлении предложена Г.Е. Джемисоном [Jamieson et al., 2015], она учитывает тип техногенного «генезиса» накопления отходов и их минералогию. Предлагается раздельно классифицировать отвалы вскрышных и вмещающих пород от хвостов

обогащения после переработки, т.к. отвалы чаще всего отвечают нормальным горным породам, хотя и находящемся в нарушенном состоянии, а хвосты являются крайне специфическим накоплением минералов, не встречаемых в природе в таких ассоциациях, более того находящихся в мелкодисперсном состоянии [Lottermoser, 2010; Lottermoser, 2022]. Помимо этого, Г.Е. Джемисон предлагает вслед за [Jamieson, 1994] разделять все минеральные ассоциации на первичные, которые существовали до добычи, но были «переотложены» и измельчены в результате добычи полезных ископаемых, и вторичные — те, которые претерпели выветривание при хранении.

Необходимо учитывать и тип минералов, которые накапливаются в отвалах и хвостах [Lottermoser, 2010], так как сама минеральная смесь определяет возможные экологические риски, оставшиеся полезные компоненты и способы их извлечения, а также тип и подверженность техногенных образований поздним изменениям.

Отвалы вскрышных пород, как объект изучения литологии, представляют собой техногенные геологические тела, формирующиеся в результате складирования пород, извлеченных при разработке месторождений твердых полезных ископаемых открытым способом. Они характеризуются широким диапазоном размеров частиц — от валунов крупнее 100 мм до пелитовых фракций менее 0,01 мм, что связано с технологией отработки. Характерной особенностью является несортированность материала с присутствием крупных (до 1–3 м) обломков в основании отвальных тел. Структурно-текстурные особенности отвалов включают отсутствие четкой слоистости и наличие блокового строения, выраженного разной степенью уплотнения. Интенсивность современного выветривания зависит от размерности частиц, а значит протекает неравномерно, в первую очередь разрушая пелитовый материал. Минералогический состав в основном соответствует материнским породам и новой системы классификации не требует.

Если вскрышные и вмещающие породы легко классифицируются классическими геологическими инструментами, то для хвостов обогащения единого подхода для классификации нет. Хвосты обогащения с точки зрения литологии можно описать как геологические тела с мелкодисперсным размером частиц алевритовой и пелитовой размерности (менее 0,25 мм), отсутствием перекрывающих пород, наличием четко выраженных границ, обусловленных техногенной укладкой отложений. В минералогическом и структурно-текстурном отношении они характеризуются сложными внутренними фациальными переходами, связанными с технологическими колебаниями состава перерабатываемой руды, водно-гравитационной сепарацией легких и тяжелых минералов и постседиментационными процессами. Это показано в предыдущих работах авторов на примере геологического описания хвостов техногенного месторождения Барун-Нарын (Республика Бурятия)

[Самсонов и др., 2024]. Выяснено, что основная причина фациально-минералогического разнообразия связана с особенностями процесса захоронения отходов, а также более позднего естественного водно-гравитационного перераспределения минеральных фаз.

Авторами предлагается комбинированный подход к классификации (табл. 2). В основе классификации лежит иерархический принцип, учитывающий происхождение отходов (технологический критерий), их вещественный состав и гипергенные преобразования. При этом, для выделения подтипов можно привлекать дополнительные критерии, обусловленные ситуативной целесообразностью, такие как гранулометрический состав, степень экологического воздействия, пригодность к переработке и так далее.

В классификации учитывается время нахождения на поверхности техногенных образований, от которого зависит текущее качественное состояние накопленного вещества и интенсивность перераспределения отдельных, в том числе полезных, компонентов внутри тел техногенных образований. Они могут быть только что накопленными и находящимися в начальной стадии окисления нестабильных минералов (например, сульфидов); окисленными — претерпевающими изменения прямо сейчас; стабилизированными — уже прошедшими стадию активного изменения и в данный момент претерпевающие только образование поздних гидроксидов.

Таблица 2

Классификационные признаки твердых полезных ископаемых техногенных образований

Уровень иерархии	Признак	Критерий выделения
I — Класс	Технологический (происхождение)	Способ получения в технологической цепочке (добыча, обогащение, передел)
II — Тип	Вещественный (минеральный)	Доминирующая минеральная ассоциация, определяющая геохимическое поведение
III — Характеристика	Гипергенное преобразование	Скорость, интенсивность и продукты вторичных изменений, факторы преобразования

На основе классификационных признаков нами выделяются следующие классы и типы техногенных образований.

1. Класс «Вскрышные и вмещающие породы».
- Минеральные ассоциации крайне вариабельные и зависят исключительно от локальной геологической ситуации конкретного месторождения. Скорость выветривания относительно низкая.
2. Класс «Хвосты обогащения».
- 2.1. Тип «Сульфидные» — сложены сульфидными (до 40%,) силикатными (до 70%) и другими минералами (до 10%). Сульфидные минералы, активно растворяются с образованием серной кислоты,

- преобразуются с образованием типичных вторичных минералов и гидроксидов железа и оказывают преобразующее влияние на подстилающие породы;
- 2.2. Тип «Оксидные» — сложены различными оксидами и гидроксидами (до 20%), кварц (до 80%), силикатами (до 10%), карбонатами и глинистыми минералами. Силикатные минералы весьма устойчивы и остаются стабильными достаточно долгое время, в то время как оксиды постепенно лимонизируются;
- 2.3. Тип «Щелочно-редкометалльные» — накапливаются преимущественно щелочные силикаты (КПШ, нефелин), апатит, кварц. В небольших количествах присутствуют монацит, бадделеит, циркон. Процесс вторичного преобразования протекает крайне избирательно, т.к. накапливаются минералы с принципиально разной степенью устойчивости к поверхностным процессам;
- 2.4. Тип «Карбонатно-силикатные» — сборная группа, сложенная резко доминирующим содержанием силикатных или карбонатно-силикатных минералов (>95%). Такие хвосты накапливаются от переработки руд скарновых и эпитермальных месторождений. Вторичные преобразования зависят от конкретной минеральной ассоциации в хвостах и могут протекать как крайне интенсивно, например, при доминировании карбонатных минералов, так и очень медленно при доминировании устойчивых силикатов;
- 2.5. Тип «Глинозёмсодержащие» — хвосты после извлечения алюминия и железа из латеритных пород. В таких хвостах накапливаются преимущественно гидроксиды железа (до 70%), алюминия (до 20%), оксиды титана (до 10%) и кальция. Такие хвосты весьма устойчивы и практически не преобразуются.
3. Класс «Шлаки».
- 3.1. Тип «Шлаки металлургических предприятий»;
- 3.2. Тип «Золошлаковые отходы энергетических предприятий».
4. Класс «Отвалный комплекс отработки россыпных месторождений».
- Данный класс формируется в результате отработки россыпей и представляет собой искусственно переотложенные и рассортированные компоненты исходных рыхлых отложений (торфа, песков, галечников). Характер вторичных преобразований в отвалах россыпей преимущественно физический (разуплотнение, седиментационная дифференциация, эрозия) и слабохимический. Активные гипергенные процессы (окисление, растворение) выражены минимально из-за преобладания химически устойчивых минералов в условиях аллювиальной седиментации.
- Ниже приводится общая характеристика по третьему иерархическому уровню классификации на примере хорошо изученных техногенных образований.
- Сульфидные. В хвостах медно-никелевых месторождений в расслоенных основных комплексах

месторождений типа Норильск-1 и Октябрьское (Красноярский край) накапливается около 70% оливина, пироксена и плагиоклаза и до 30% пирротина с подчиненным количеством халькопирита и пентландита [Бодуэн и др., 2013].

Для месторождений колчеданного типа, таких как Новоучалинское (Республика Башкортостан), в хвостах обогащения накапливается до 60% сульфидов с резким доминированием пирита и в подчиненном количестве халькопирита, сфалерита и других сульфидов и до 40% силикатов, представленных в основном кварцем и хлоритом [Ангелов и др., 2012]. Характерно, что современное минералообразование в хвостах зависит от их климатической локализации. В хвостах Норильских месторождений накапливаются ярозит, гипс и гётит. А в хвостах колчеданных месторождений (Новоучалинское месторождение (Южный Урал), Ново-Урское месторождения (Алтайский край)) помимо ярозита, гётита и гипса также образуются меллантерит, гидрогематит, ковеллин, вюртцит, барит с другими сульфатами и глинистые минералы [Шадрунова и др., 2005; Юркевич и др., 2024].

Однако, хвосты молибден-вольфрамовых месторождений могут быть классифицированы в разные типы в зависимости от доминирующего минерала в ассоциации — сульфидного, карбонатного или оксидного. Например, хвосты Барун-Нарынского месторождения (Республика Бурятия) [Самсонов и др., 2024], согласно предлагаемой классификации, должны быть отнесены к сульфидной группе, так как среди рудных минералов в хвостах значительно доминируют сульфиды, в то время как вольфрамит и другие минералы имеют подчиненное значение.

Оксидные. Хвосты формируются при переработке руд, где доминируют оксиды железа, марганца или титана (например, магнетитовые или ильменитовые руды). Наиболее яркими примерами являются месторождения Курской магнитной аномалии (Михайловское, Лебединское и др.) и группа Оленегорских месторождений (Мурманская область). В хвостах их переработки накапливаются в основном магнетит (10-15%), гематит (5-10%), кварц (60-70%) и хлорит (до 10%) с резко подчиненным количеством амфиболов [Косинова, 2009.]. Вторичным изменениям подвержены оксиды железа, которые активно лимонитизируются, образуя железистые «шляпы».

Щелочно-редкометалльные. В хвостах накапливаются нефелин, калиевой полевошпат, эгирин, лопарит, эвдиалит, апатиты (в том числе и Sr содержащие), магнетит и ильменит. Среди российских техногенных образований наиболее яркими примерами такого типа являются хвосты переработки руд Ловозёрского месторождения и месторождений Хибинского массива (Мурманская область) [Архипов, Решетняк, 2017]. В хвостах Ловозёрского месторождения основную накопленную массу составляют щелочные силикаты (нефелин, КППШ, эгирин) — 90%, содержание лопарита и эвдиалита не превышает 1% [Максимова и др. 2022]. Для хвостов Хибинских месторождений характерно

накопление нефелина (45-55%), эгирина (16-23%), КППШ (6-8%) с подчиненным количеством апатита, титанита, магнетита и ильменита.

Скорость разрушения минералов в таком типе сильно отличается. Нефелин и КППШ наиболее подвержены разрушению с образованием цеолитов и слоистых алюмосиликатов [Schumann, 1993], по магнетиту очень быстро формируется лимонит, а апатит и лопарит — устойчивые минералы, которые будут достаточно долго сохраняться от выветривания.

Карбонатно-силикатные. Объединенная группа, куда относятся все хвосты, минеральная ассоциация которых представлена резко доминирующими силикатными или силикатно-карбонатными минералами над всеми другими. Наиболее яркий пример — хвосты переработки скарновых руд. В хвостах Тырнаузского месторождения накапливаются полевые шпаты (30-45%), слюды (10-15%), кальцит (3-7%), гранаты и пироксены (5-10%) при незначительном содержании сульфидов (до 3%) и еще меньшем содержании шеелита (до 0,3%) [Евдокимов, Евдокимов, 2014]. Стоит отметить, что для такой минеральной ассоциации характерно последующее гравитационное перераспределение минералов в пределах тела хвостов. Шеелит, будучи самым тяжелым минералом среди всех, претерпевает вертикальную миграцию и опускаясь вниз формирует зоны вторичного обогащения [Бортников и др., 2014].

Определенную сложность составляет классификация хвостов таких комплексных месторождений полезных ископаемых как Ковдорское (Мурманская область), т.к. по минеральному составу они могут быть отнесены в разные группы. Например, в хвостах Ковдорского месторождения накоплено существенное количество как оксидных минералов (магнетит, гематит), так и кальцита, нефелина, апатита и флогопита с подчиненным количеством бадделеита.

Шлаковые отходы — это отдельная большая группа техногенных образований, получаемая в результате металлургического производства или сжигания энергетических ресурсов. Минералогический и химический состав шлаков совершенно отличен как от природных горных пород, так и от отходов недропользования, получаемых при отработке месторождений твердых полезных ископаемых. В рамках данной работы шлаковые отвалы рассматриваются как отдельный класс техногенных образований. Их детальная типизация по вещественному составу представляет собой самостоятельную сложную задачу и требует отдельного исследования. В качестве примера для демонстрации особенностей минералогического состава таких отложений приводится подгруппа золошлаков, которая формируется в результате сжигания угля на энергетических предприятиях. Для золошлаков характерно наличие минеральных фаз, не встречаемых в природе: мета- и ортосиликаты кальция, алюминаты, ферриты, алюмоферриты, частично или полностью дегидратированные

формы глинистых минералов, а также муллит. В значительных количествах содержатся различные модификации оксида кремния, гидроксиды кальция (портландит) и магнезия [Бембеев, Самсонов, 2024].

Особенности пространственного размещения полезных ископаемых техногенных образований.

Техногенные образования не возникают изолированно. Как показано выше, состав и распределение в них полезных ископаемых напрямую зависят от геологических особенностей исходных коренных месторождений. Например, хвосты обогащения медно-колчеданных руд Южного Урала сохраняют характерные для этого региона элементы (Cu, Zn, Pb, Au, S), а отвалы апатит-нефелиновых месторождений Кольского полуострова концентрируют редкоземельные металлы и фосфор. Это означает, что техногенные отложения наследуют металлогеническую специализацию территорий, становясь своего рода отражением первичных рудных систем. Но при этом приобретают новые черты за счет технологического передела, например, в отвалах могут концентрироваться редкие и рассеянные элементы, которые не извлекались при первичной переработке.

Если традиционная металлогения выделяет провинции на основе геодинамических обстановок и магматических процессов [Старостин, 2021], то для техногенных месторождений ключевым критерием становится их приуроченность к горнопромышленным районам. Концентрация отвалов и хвостохранилищ вокруг крупных горнодобывающих центров, таких как Кольский полуостров, Южный Урал или Курская магнитная аномалия, создает четкие пространственные закономерности. Эти скопления можно рассматривать как экзогенно-техногенные металлогенические провинции твердых полезных ископаемых — территории, где антропогенная деятельность привела к возможности формирования вторичных месторождений с характерными ассоциациями элементов.

При этом важно учитывать, что техногенные провинции не дублируют природные, а дополняют их за счет перераспределения вещества. Например, в хвостах могут накапливаться элементы, которые ранее не имели промышленного значения: так, например, отвалы железорудных месторождений КМА содержат высокие концентрации ванадия [Золототрубов, 2007]. Это открывает возможность для выделения новых типов оруденения, характерных исключительно для техногенных систем.

С учетом современного состояния изученности полезных ископаемых техногенных образований России полноценное выделение провинций для всей территории страны весьма трудоемко и требует большого количества дополнительных геологических и технологических исследований. Но на вышеописанных примерах отходов добычи и переработки минерального сырья можно продемонстрировать принцип выделения экзогенно-техногенных металлогенических провинций.

1. *Кольская редкометалльно-фосфорная провинция*, связанная с переработкой щелочных пород и карбонатитов. Характеризуется накоплением в техногенных образованиях редкоземельных элементов, ниобия, тантала и циркония. Здесь хвосты апатит-нефелинового и магнетитового обогащения, подвергаясь воздействию субарктического климата, формируют уникальные минеральные ассоциации с цеолитами и фторидными соединениями.

2. *Уральская полиметалльная провинция*, наследующая особенности колчеданных и порфировых месторождений, характеризуется техногенными образованиями с высокими содержаниями меди, цинка и золота. Процессы окисления в условиях резко континентального климата приводят к образованию ярозит-мелантеритовых ассоциаций и вторичных минералов меди, создавая комплексные месторождения, содержащие также селен и теллур. На данный момент является самой изученной техногенной провинцией России [Джалалова и др., 2003; Вильямсон, 2003; Макаров и др., 2022].

3. *Курская железорудная провинция*, связанная с переработкой докембрийских железистых кварцитов железисто-кремнисто-сланцевой формации, выделяется как крупнейший в мире техногенный железорудный район. Основными рудными минералами железисто-кремнистых пород являются магнетит и гематит; кроме того, в них установлено наличие благороднометалльной минерализации [Чернышов, 2003; Старостин, 2007; Удачин, 2005]. Золото в рудах весьма мелкое и распределено крайне неравномерно. Однако колоссальный объем добычи и переработки железистых кварцитов способствует накоплению в отвальных хвостах значимых количеств как недоизвлеченного железа, так и золота и ванадия. Гипергенные процессы в условиях умеренного климата формируют здесь характерные охристые корки из гидроксидов железа.

В контексте настоящего исследования в современных условиях необходимо также учитывать разрыв первичных геолого-географических связей. Глобальные цепочки поставок сырья приводят к тому, что на обогатительных и металлургических предприятиях может перерабатываться руда из различных, часто удаленных месторождений. Для регионов с развитыми экономическими связями, где на местных предприятиях прорабатывается материал удаленных месторождений справедливо выделять новый тип экзогенно-техногенных металлогенических провинций — технологически-специализированных. Их состав определяется не столько локальной геологией, сколько технологическим профилем предприятия и геохимическими особенностями руд, поступающих из разных источников.

Таким образом, техногенные провинции представляют собой динамичные системы, отражающие как исторически сложившуюся геологическую специфику региона, так и современную глобальную экономику минерального сырья.

Вышеизложенные выводы убедительно демонстрируют, что полезные ископаемые техногенных образований являются значимым компонентом геологической среды, требующим глубокого системного изучения. Однако для формирования целостной картины и перехода от разрозненных исследований к прогнозированию эволюции и эффективному освоению техногенных месторождений необходима постановка широкого комплекса работ. Этот комплекс должен включать не только дальнейшее расширение географии исследований для накопления базы данных химического и минералогического анализов, но и разработку специальных методов картирования, а также создание детальных геолого-экономических моделей. Только такой интегрированный подход, реализуемый в рамках формирующегося направления антропогенного литогенеза, позволит полностью раскрыть ресурсный потенциал техногенных образований и минимизировать их негативное воздействие на окружающую среду.

Заключение. Техногенные образования представляют собой не просто инертные накопления вещества, а динамичные геологические системы, формирующие принципиально новый класс поверхностных геологических формаций. Их ключевой особенностью является аномально высокая, по сравнению с природными аналогами, скорость преобразований, обусловленная искусственным минеральным составом, нарушенной структурой, дисперсностью и отсутствием естественных буферных механизмов. Это требует применения к их изучению комплексного литологического подхода, включающего анализ стадийности выветривания, фациально-литологического анализ и картирование морфологии зон изменения. Развитие такого подхода является основой для формирования нового раздела геологии — антропогенного литогенеза.

Состав и пространственное распределение полезных ископаемых техногенных образований яв-

ляется прямым следствием геолого-генетических особенностей исходных коренных месторождений. На основе минералого-геохимического анализа выделены устойчивые типы хвостов обогащения (сульфидные, оксидные, щелочно-редкометалльные и др.), каждый из которых наследует и специфически трансформирует элементные ассоциации первичных рудных систем. Это позволило обосновать принцип экзогенно-техногенной металлогении, в рамках которого скопления полезных ископаемых техногенных образований рассматриваются как специализированные металлогенические провинции (на примере Кольской, Уральской и Курской). Данные провинции не просто дублируют природные, но и дополняют их за счет технологического перераспределения вещества, концентрируя элементы, не извлекавшиеся ранее, и формируя тем самым новые типы оруденения.

Перспективы дальнейших исследований должны заключаться в системном и целевом анализе накопленных данных с получением новой информации о техногенных образованиях слабоизученных регионов. Ключевыми направлениями являются:

1. Разработка единых методических подходов к паспортизации и кадастрированию техногенных объектов на основе предложенной классификации, что позволит систематизировать существующие массивы данных горнодобывающих компаний и надзорных органов для целей металлогенического анализа;

2. Целевое применение современных геоинформационных и минералого-геохимических методов (ДЗЗ, микрозондовый анализ, LA-ICP-MS, LIBS и др.) для детального изучения форм нахождения ценных и токсичных элементов в эталонных объектах, моделирования их эволюции, прогнозирования накопления и перераспределения компонентов в техногенных образованиях, с целью определения стратегии их извлечения и нейтрализации негативного экологического воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Амосов П.В., Бакланов А.А., Горячев А.А. и др. Пыление хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд: экологическая проблема и пути ее решения. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2023. 168 с.

Ангелов В.А., Ангелова Е.И., Аверьянов К.А. Изучение особенностей вещественного состава хвостов обогащения медно-колчеданных руд учалинской обогатительной фабрики // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 5. С. 362–368.

Архипов А.В., Решетняк С.П. Техногенные месторождения. Разработка и формирование. Апатиты: КНЦ РАН, 2017. 175 с.

Бембеев Д.Б., Самсонов А.А. Геохимическая характеристика золотшлаков из углей Мугунского месторождения (Иркутская область) // Недропользование XXI век. 2024. № 2 (103). С. 28–35.

Бодуэн А.Я., Петров Г.В., Мардарь И.И. и др. Извлечение благородных и цветных металлов из техногенного сырья Норильского промышленного региона: практика

и исследования // Успехи современного естествознания. 2013. № 3. С. 143–145.

Бортников Н.С., Богатилов О.А., Карамурзов Б.С. и др. Утилизация хранилищ промышленных отходов обогатительной фабрики Тырныаузского вольфрамowo-молибденового комбината — одно из необходимых мероприятий для решения экологических проблем в приэльбрусье (Кабардино-Балкарская республика) // Вестник ВНИЦ. 2014. № 1. С. 35–41.

Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П. Геохимия техногенных систем. Новосибирск: Гео, 2006. 169 с.

Вильямсон Б., Удачин В.Н., Спири Б. и др. Процессы изменения состава поверхностных вод при техногенезе в Учалинском горнодобывающем районе // Геология, полезные ископаемые и проблемы экологии Башкортостана. Т. 2. Уфа, 2003. С. 187–194.

Гальперин А.М., Кутепов Ю.И., Круподеров В.С. и др. Гидромеханический мониторинг и освоение техногенных массивов на горных предприятиях // Горный

информационно-аналитический бюллетень. 2012. № S1. С. 44–58.

Джалалова Г.Т. Кислотно-основные свойства почв в районе деятельности Учалинского горно-обогатительного комбината (УГОКа) // Геология, полезные ископаемые и проблемы экологии Башкортостана. Т. 2. Уфа, 2003. С. 203–206.

Евдокимов С.И., Евдокимов В.С. Извлечение металлов из лежалых хвостов вольфрамо-молибденовой обогатительной фабрики // Вестник ВНИЦ. 2014. № 2. С. 46–52.

Золототрубов Е.Б. Геоэкологическая оценка территории Михайловского промышленного района: Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. Воронеж: ВГУ, 2007. 23 с.

Касимов Н.С., Перельман А.И. Геохимия ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1999. 610 с.

Косинова И.И. Экологическая геология Курской магнитной аномалии. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 2009. 216 с.

Макаров А.Б., Талалай А.Г., Гуман О.М. и др. Техногенные месторождения и особенности их воздействия на окружающую среду // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2022. № 3. С. 120–129.

Максимова В.В., Красавцева Е.А., Савченко Е.Э. и др. Исследование состава и свойств хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 542–650.

Овчинников Л.Н. Металлогенетические провинции России. М.: ИМГРЭ, 2001. 172 с.

Разумова В.Н., Херасков Н.П., Черняховский А.Г. Геологические типы кор выветривания и примеры их распространения на Южном Урале // Труды Геологического института Т. 57. Под ред. А.В. Пейве. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 139 с.

Самсонов А.А., Бурмистров А.А., Тельнов А.Е. Минерально-сырьевой потенциал и комплексное использование природных и техногенных месторождений вольфрама Джидинского рудного поля (г. Закаменск, Республика Бурятия) // Руды и металлы. 2024. № 1. С. 17–35.

Старостин В.И. Металлогения: учебник. М.: МАКСПресс, 2021. 652 с.

Старостин В.И., Пельмский Г.А., Сакия Д.Р. Золотосодержащие железистых кварцитов Восточно-Европейской платформы // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2007. № 2. С. 3–14.

Старостин В.И., Самсонов А.А. Минеральные ресурсы и цивилизация. 3-е изд., переработ. и доп. М.: МАКСПресс, 2023. 288 с.

Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 212 с.

Трофимов В.Т. Инженерная геология: Учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2023. 573 с.

Трофимов В.Т., Королёв В.А., Герасимова А.С. Классификация техногенных воздействий на геологическую среду // Геоэкология. 1995. № 5. С. 96–107.

Удачин В.Н. Экогеохимия горнопромышленного техногенеза Южного Урала: Автореф. дисс. ... докт. г.-м. н. Миасс: ФГБУН ИМ СО РАН, 2012. 44 с.

Удачин В.Н., Вильямсон Б.Д. Геотехнические системы Южноуральского субрегиона биосферы // Проблемы горных территорий. Алматы, 2005. С. 38–42.

Фролов В.Т. Процесс континентального литогенеза. М.: Наука, 212 с.

Чернышов Н.М., Петров С.В., Молотков С.П. Особенности распределения и формы нахождения благородных металлов в железистых кварцитах Михайловского месторождения КМА и их техногенных продуктах (Центральная Россия) // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2003. № 1. С. 93–104.

Чуриков Ю.А., Самсонов А.А., Ишмухаметова В.Т. Использование данных дистанционного зондирования земли для анализа экологической нагрузки и рудного потенциала техногенных отвалов Ковдорского ГОКа // Недропользование XXI век. № 3-4. 2023. С. 52–63.

Шадрунова И.В., Малашита А.В., Павлова В.И. и др. Комплексная физико-химическая технология переработки хвостов обогащения медно-цинковых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 12. С. 188–197.

Шерстюк Н.П. Активизация гипергенных процессов в водных объектах районов добычи полезных ископаемых (на примере Криворожского железорудного бассейна) // Изв. высших учебных заведений. Поволжский регион. 2014. № 2(6). С. 108–118.

Юркевич Н.В., Шавекина Н.В., Гаськова О.Л. и др. Аутигенные барит в техногенных отвалах: минералогическо-геохимические данные и результаты физико-химического моделирования // Георесурсы. 2024. Т. 26. № 1. С. 38–51.

Acharya B.S., Kharel G. Acid mine drainage from coal mining in the United States — An overview // Journal of Hydrology. 2020. Vol. 588. P. 125061.

Dold B. Acid rock drainage prediction: A critical review // Journal of Geochemical Exploration. 2016. Vol. 172. P. 120–132.

Dold B. Evolution of Acid Mine Drainage Formation in Sulphidic Mine Tailings // Minerals. 2014. Vol. 4. P. 621–641.

Donald R.J., Chermak J.A., Gagen P.M. Rates of Reaction of Galena, Sphalerite, Chalcopyrite, and Arsenopyrite with Fe(III) in Acidic Solutions / Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation ed. Alpers C.N., Blowes D.W. 1993. P. 3–13.

Ford J.R., Price S.J., Cooper A.H. An assessment of lithostratigraphy for anthropogenic deposits // Geological Society. 2014. Vol. 395. P. 55–89.

Jambor J.L. Mineralogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products // Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes. 1994. Vol. 22. P. 59–102.

Jamieson H.E., Walker S.R., Parsons M.B. Mineralogical characterization of mine waste // Applied Geochemistry. 2015. Vol. (57). P. 85–105.

Lottermoser B.G. Environmental Indicators in Metal Mining. 2nd ed. Berlin: Springer, 2022. 518 p.

Lottermoser B.G. Mine Wastes. Berlin: Springer, 2010. 400 p.

Nordstrom D.K., Alpers N.C., Ptacek C.J., et al. Negative pH and Extremely Acidic Mine Waters from Iron Mountain, California // Environmental Science & Technology. 1999. Vol. 34 (2) P. 254–258.

Plumlee G.S. The Environmental Geology of Mineral Deposits // Economic Geology. 2023. Vol. 118 (3). P. 523–525.

Schumann A. Changes in mineralogy and geochemistry of a nepheline syenite with increasing bauxitization, Poços de Caldas, Brazil // Chemical geology. 1993. Vol. 107. № 3–4. P. 327–331.

Статья поступила в редакцию 05.11.2025,
одобрена после рецензирования 12.11.2025,
принята к публикации 27.02.2026