

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2025, Том 12, № 4 / 2025, Vol. 12, Iss. 4 <https://resources.today/issue-4-2025.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/24NZOR425.pdf>

DOI: 10.15862/24NZOR425 (<https://doi.org/10.15862/24NZOR425>)

1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические, географические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Притужалова, О. А. Извлечение редкоземельных элементов из наземных и морских минеральных отложений и из отходов: оценка воздействия на окружающую среду / О. А. Притужалова, И. А. Жованик, Ю. В. Жованик // Отходы и ресурсы. — 2025. — Т. 12. — № 4. — URL: <https://resources.today/PDF/24NZOR425.pdf>.
DOI: 10.15862/24NZOR425.

For citation:

Prituzhalova O.A., Zhovanik I.A., Zhovanik Yu.V. Extraction of rare earth elements from terrestrial and marine mineral sediments and waste: an environmental impact assessment. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2025;12(4): 24NZOR425. Available at: <https://resources.today/PDF/24NZOR425.pdf>.
DOI: 10.15862/24NZOR425. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 504.05:661.865

Притужалова Ольга Александровна

ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», Тюмень, Россия
Доцент

Кандидат географических наук

E-mail: o.a.prituzhalova@utmn.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0720-9793>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=891523

Жованик Илья Александрович

ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», Тюмень, Россия
Ассистент

E-mail: i.a.zhovanik@utmn.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9233-4782>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1228798

Жованик Юлия Викторовна

ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», Тюмень, Россия
Старший преподаватель

E-mail: y.v.zhovanik@utmn.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4512-0788>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1194928

Извлечение редкоземельных элементов из наземных и морских минеральных отложений и из отходов: оценка воздействия на окружающую среду

Аннотация. В условиях дефицита редкоземельных элементов на рынке встает вопрос экологической целесообразности их извлечения из вторичного сырья. Целью статьи является сопоставление уровня негативного воздействия на окружающую среду при извлечении редкоземельных элементов из первичного и вторичного сырья с учетом всего их жизненного цикла.

При помощи системного анализа данных актуальной научной литературы установлены ключевые экологические риски, характерные для извлечения редкоземельных элементов из

разного вида сырья. При наземной добыче наибольшие риски вызваны преобразованием ландшафтов и химическим загрязнением окружающей среды. В частности, опасения вызывают радиоактивность первичного сырья, образование отвалов вмещающих пород и хвостохранилищ, выбросы пыли, кислых газов, сбросы взвешенных веществ, металлов, кислот и щелочей в составе сточных вод. Морская добыча редкоземельных элементов из глубоководных илов и железомарганцевых конкреций связана с теми же загрязняющими веществами, но с иными объектами-реципиентами воздействия. В первую очередь, она грозит разрушением уникальных глубоководных экосистем, а также оказывает влияние на толщу и поверхностные слои воды. Причем зона распространения воздействия на морскую среду гораздо протяженнее, чем при наземной добыче за счет формирования шлейфа взвесей. А опыт сокращения воздействия и рекультивации морских экосистем на больших глубинах отсутствует. Извлечение редкоземельных элементов из отходов производства и потребления дает ряд экологических преимуществ: отсутствие проблемы радиоактивности, расположение источников сырья вблизи крупных городов, уменьшение объемов захоронения отходов. Также получение редкоземельных металлов из отходов помогает сокращать объемы добычи полезных ископаемых (и связанных с ней экологических рисков), снижать зависимость от импорта сырья, а также сбалансировать рынок, сокращая дефицит критических редкоземельных элементов.

Ключевые слова: редкоземельные элементы; воздействие на окружающую среду; переработка; урбан майнинг; устойчивое развитие; зеленая экономика; ресурсосбережение

В последние десятилетия появилось множество областей применения редкоземельных элементов (РЗЭ), запасы которых имеются в ограниченном количестве стран, что порождает их дефицит на рынке. В этих условиях сформировался запрос на получение РЗЭ из альтернативных источников сырья. Добыть РЗЭ можно из двух типов источников: первичное сырье — наземные минеральные отложения, морские отложения и морская вода, вторичное сырье — отходы переработки апатитового концентрата, золошлаковые отходы угольных ТЭС, хвостохранилища, сформировавшиеся в результате извлечения золота, меди, урана, полигоны коммунальных отходов, электронные и иные отходы.

В ходе сравнения методов извлечения РЗЭ из первичного и вторичного сырья на передний план обычно выдвигаются аспекты технологической и экономической эффективности, вместе с тем, экологические последствия такой деятельности обладают не меньшей значимостью [1]. Поэтому **целью работы** было сравнение негативного воздействия на окружающую среду (НВОС) извлечения РЗЭ из первичного и вторичного сырья с учетом всего их жизненного цикла по данным научной литературы.

Объекты и методы исследования

В настоящей работе применен метод системного анализа данных, представленных в научной литературе по вопросу воздействия получения РЗЭ из разного вида сырья. Поиск публикаций проводился в поисковых системах «Академия Google», «КиберЛенинка», «eLIBRARY.RU» без ограничения по срокам давности публикаций. Поисковые запросы выполнялись с использованием следующих ключевых слов на русском и английском языках: редкоземельные элементы, редкоземельные металлы, экологические аспекты, воздействие на окружающую среду добычи РЗЭ, воздействие на окружающую среду переработки РЗЭ, оценка жизненного цикла РЗЭ.

Результаты приводятся с привязкой к отдельным этапам жизненного цикла РЗЭ по следующей схеме: основные технологические решения, связанные с ними экологические риски. Для нетрадиционных источников РЗЭ (морские отложения, воды, вторсырье) также

кратко охарактеризованы ресурсная база и ее экологически значимые особенности (такие, как уровень содержания радиоактивных элементов).

Результаты

Жизненный цикл РЗЭ состоит из следующих этапов: добыча сырья, содержащего РЗЭ, первичная переработка его в концентрат, содержащий смесь РЗЭ (обогащение), глубокая переработка концентрата в оксиды, фториды, хлориды отдельных металлов и получение чистых металлов, получение продукции с содержанием РЗЭ, использование продукции, переработка продукции (опционально), захоронение или сжигание отходов использования продукции, содержащей РЗЭ (рис. 1). Каждый этап сопровождается НВОС.

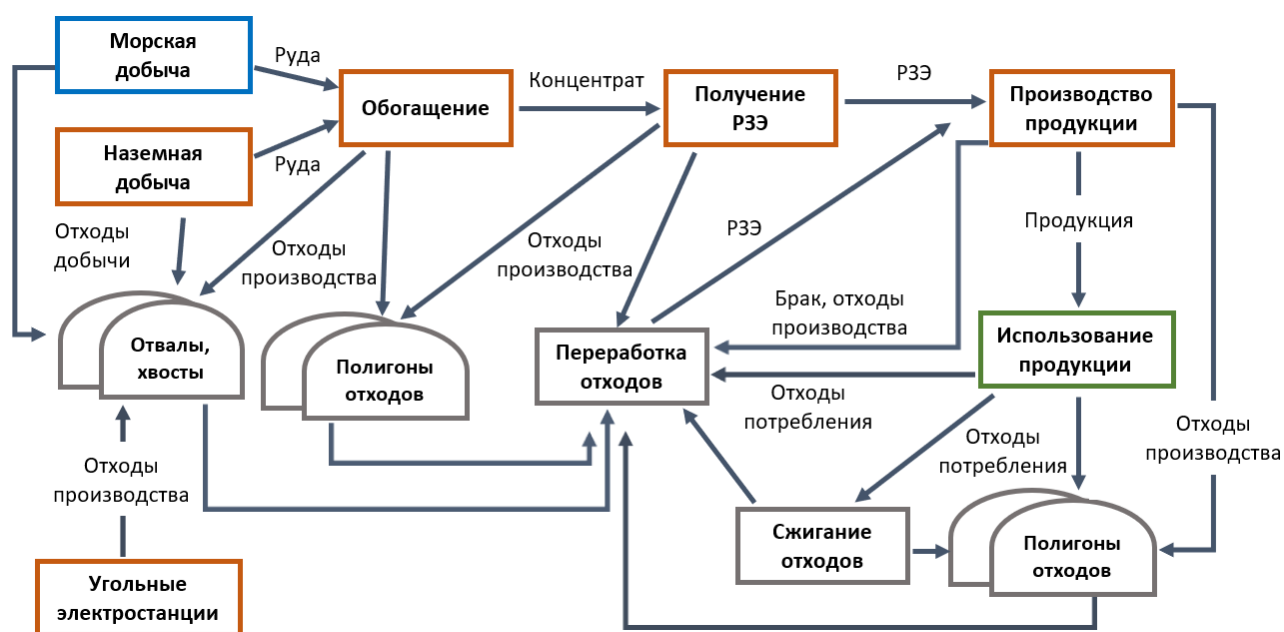


Рисунок 1. Схема жизненного цикла РЗЭ (составлено авторами)

Получение РЗЭ из наземных минеральных отложений

Добыча РЗЭ возможна при разработке месторождений (богатые руды, глины и пески) и при их равномерном распространении в земной коре [2; 3]. Основными методами добычи РЗЭ из массивов скальных пород являются карьерный и шахтный методы с типичными для горнодобывающего производства технологическими операциями. При подземном выщелачивании (*in-situ leaching*) раствор реагентов через густую сеть скважин закачивается непосредственно в рудный массив, и минералы растворяются на месте. Подъем твердой породы на поверхность не нужен — РЗЭ извлекают из прокачиваемого сквозь пласты раствора.

Максимальное негативное воздействие на окружающую среду оказывает карьерная добыча, особенно при использовании пород с низкими концентрациями РЗЭ, при которой площади нарушаемых ландшафтов, объемы отходов, потребление энергии, выбросы пыли и парниковых газов наибольшие. Во всех случаях серьезные риски для экосистем связаны со способностью РЗЭ к биоаккумуляции в тканях живых организмов и их токсичностью [4–7].

В процессе **обогащения и переработки содержащего РЗЭ сырья** применяются такие методы как дробление и измельчение, флотация, химическое выщелачивание, экстракция с использованием органических растворителей или ионообменных смол с последующим разделением [8]. Экстракция РЗЭ из добытого сырья также связана с негативным воздействием

на окружающую среду за счет образования токсичных сточных вод, выбросов в воздушную среду, опасных отходов, а также за счет высокого уровня энергозатрат и связанных с ними выбросов парниковых газов.

Добыча и обогащение РЗЭ также сопряжены с широким спектром рисков для работников задействованных предприятий и жителей регионов, где ведется деятельность.

Получение РЗЭ из морских минеральных отложений

В условиях дефицита наземных месторождений и высоких экологических рисков их освоения потенциально значимый источник РЗЭ представляют собой морские отложения (глубоководные илы, ферромарганцевые конкреции абиссальных равнин).

Так, на предмет состава исследованы **глубоководные илы** в Тихом океане. Концентрации тяжелых РЗЭ в иле на дне Тихого океана достигают 200–430 частей на миллион (восточные области в Южном полушарии) и 70–180 частей на миллион (в Северном полушарии, восточнее и западнее Гавайских островов). Концентрации всех измеренных РЗЭ составляют 1 000–2 230 и 400–1 000 частей на миллион, соответственно [9]. Это сопоставимо с концентрациями РЗЭ разрабатываемых месторождений ионно-сорбционных глин на юге Китая (50–200 частей на миллион по тяжелым РЗЭ, 500–2 000 — по сумме всех РЗЭ [10]. При этом мощность залежей на дне моря измеряется десятками метров, наряду с РЗЭ в них встречаются другие ценные металлы, а концентрации радиоактивных Th и U ниже, чем на месторождениях суши. В ходе более поздних исследований у берегов Японии выявлены глубоководные илы с высоким содержанием РЗЭ (среднее содержание — 964 частей на миллион, максимальное содержание — почти 8 000 частей на миллион). Эти запасы характеризуются легкостью извлечения, а также существенной долей дефицитных элементов — Y, Eu, Tb и Dy [11].

РЗЭ есть в составе **железомарганцевых конкреций**. Их месторождения известны в зоне Кларион–Клиппертон, в бассейне Перу, в бассейне Пенрин и в Центральном бассейне Индийского океана; ученые предполагают, что под поверхностью молодых отложений могут быть более старые отложения конкреций [12].

Добыча РЗЭ из морских отложений пока ограничивается экспериментальными проектами. Для промышленного извлечения РЗЭ из морского ила предлагается использование гидравлических насосов. Сбор конкреций со дна океана можно осуществлять горными машинами на гусеничном ходу, оснащенными механическими или гидравлическими подъемными механизмами [13; 14].

Морские полиметаллические конкреции представляют собой особый тип отложений, не имеющих наземных аналогов: они состоят из нанометровых оксидов марганца и оксигидроксидов железа, которые эпитаксиально срастаются. Обычными методами обогащения, такими как флотация, магнитная сепарация их отделить невозможно. Необходимо применение пирометаллургии (плавка конкреций при температуре 1 400–1 500°C), гидрометаллургии (химическое растворение конкреций в серной или соляной кислоте или в растворах сульфата и карбоната аммония). Лабораторные эксперименты показывают, что возможна также микробиологическая обработка (растворение бактериями или грибами) [15; 16].

При глубоководной добыче металлов исключаются некоторые экологические риски, характерные для разработки месторождений суши. Так, для разработки морских отложений не требуются вырубка лесов, сооружение дорог, зданий, отведение территорий под отвалы отходов, удаление вскрышных пород, откачка кислых вод из шахт и рудников, не происходит масштабное понижение уровня грунтовых вод.

Вместе с тем, процесс сбора сырья со дна и его подъема на поверхность моря характеризуется высокими энергозатратами, связанными с выбросами парниковых газов при выработке энергии, и такими экологическими рисками как нарушение донных экосистем, включая гидротермальные источники и медленно восстанавливающиеся кораллы, загрязнение морской воды взвешенными веществами, возможные утечки химикатов, содержащих биодоступные токсичные металлы и кислоты.

В особенности стоит отметить урон биоразнообразию. Факторами воздействия на донные организмы (бентос) являются непосредственное уничтожение донных организмов при работе тяжелой техники, захоронение их под слоем донных осадков, закупорка фильтрующих аппаратов зоопланктона, нарушение питания и светового режима морских организмов за счет формирования шлейфов взвесей [17; 18]. Важно добавить, что сами конкреции являются средой обитания живых организмов (многие моллюски крепятся к конкрециям, также конкреции являются субстратом для развития микробов). Также от загрязнения при добыче РЗЭ из морских отложений страдают организмы, обитающие в толще воды и у ее поверхности. При этом специалистами отмечается, что повторное заселение нарушенных местообитаний в глубоководных районах происходит медленнее, чем на суше, а технологии рекультивации морских глубин дороги, их эффективность не установлена, а для водной толщи технологии рекультивации отсутствуют [17].

Получение РЗЭ из морской воды

Концентрации РЗЭ в морской воде чрезвычайно низкие, варьирующиеся в диапазоне от $10 \cdot 10^{-12}$ до $70 \cdot 10^{-12}$ моль/кг, что делает их извлечение сложной задачей, хотя огромные объемы океана — теоретически неисчерпаемый источник [19].

Технологии извлечения РЗЭ из водных растворов, включая морскую воду, находятся на стадии экспериментов. Одним из перспективных направлений являются адсорбционные методы. В частности, исследования показывают, что бифункциональные адсорбенты, такие как β -циклодекстрин, сшитый с этилендиаминтетрауксусной кислотой, способны избирательно связывать РЗЭ даже при низких концентрациях в водной среде [20].

Производство и использование содержащей РЗЭ продукции

Основными сферами использования РЗЭ в экономике являются производство мощных постоянных магнитов (для создания электродвигателей, авиационных генераторов, генераторов ветряных турбин, жестких дисков и пр.), катализаторов для нужд нефтяной и автомобильной промышленности, полирующих материалов, солнечных батарей, люминофоров (для производства цветных дисплеев, энергосберегающих ламп и рентгеновских экранов), стёкол для «умных зданий». В металлургии РЗЭ применяются в качестве легирующих добавок для улучшения свойств сплавов. Также они используются в ядерной энергетике (как поглотители нейтронов в ядерных реакторах), в медицине (в составе препаратов для магнитно-резонансной терапии и лекарств) [8].

Многие виды продукции, создаваемой на основе РЗЭ и имеющей решающее значение для перехода к зеленой экономике, совсем неэкологично производятся, способствуя формированию таких проблем как изменение климата, закисление окружающей среды и эвтрофикация [21]. На этапе ее производства наблюдаются потери РЗЭ со сточными водами, пылью, твердыми отходами (об извлечении РЗЭ из отходов производства см. ниже), однако львиная их часть переходит в продукцию.

По оценкам на 2007 г. общемировые запасы РЗЭ в используемой продукции в тыс. т составляли: 143,6 — Ce, 136 — Nd, 86 — La, 50 — Pr, 8,6 — Dy, 6,9 — Y, 3,6 — Gd, 3,3 — Sm, 0,7 — Tb, 0,4 — Eu [22].

При использовании продукции возникает проблема рассеивания РЗЭ в окружающей среде через механическое истирание, коррозию, термическое воздействие. Часть продукции активнее рассеивает РЗЭ в окружающей среде, (боевые ракеты или волоконно-оптические усилители). Другая часть, скорее, сохраняет РЗЭ в своем составе. Среди сохраняющих РЗЭ продуктов выделяют две группы: (1) быстроотслуживающие (светодиодные лампы, зажигалки); (2) продукты длительного использования (ветрогенераторы, компьютеры). Так, задержка рынка электронного лома составляет 4–7 лет [23].

В городской дорожной пыли в районах с высоким трафиком установлены высокие концентрации церия и лантана, что связано с использованием автомобильных катализаторов [24–26]. Контрастные вещества, используемые в магнитно-резонансной томографии, становятся источником загрязнения водопроводной воды гадолинием [27]. В природной дождевой воде мегаполисов также обнаруживаются РЗЭ, что может быть следствием широкого использования плазменных дисплеев телевизоров и магнитооптических дисков [28]. Соединения РЗЭ (Ce, La, Y) иногда добавляются в удобрения для повышения урожайности. При внесении в почву удобрений РЗЭ не метаболизируются растениями полностью, а накапливаются в почве и мигрируют в грунтовые воды [29–31]. В случае длительной эксплуатации люминофоров в составе светодиодов и экранов, особенно при перегреве, может происходить деградация люминофоров [32–33] с образованием мелкодисперсной пыли, содержащей Eu, Tb, Y.

Завершение жизненного цикла содержащей РЗЭ продукции

В конце своего жизненного цикла РЗЭ в составе той или иной продукции попадают на переработку (соответствующие воздействия на окружающую среду рассматриваются ниже) либо направляются на полигоны отходов или на мусоросжигательные заводы (МСЗ). Возможно также их оставление в окружающей среде (на стихийных свалках) и попадание в водные объекты, вплоть до выноса в Мировой океан. Так, в 2007 г. общемировой поток РЗЭ на полигоны отходов достигал 21,6 тыс. т Ce, 17,3 тыс. т La, по 1–3 тыс. т Pr, Nd и Y [22]. Это означает не только загрязнение компонентов окружающей среды, но и утрату возможности повторного использования ценных элементов (исключением являются шлаки и зола МСЗ, поскольку технологии для извлечения из них РЗЭ разработаны [34–35]).

Транспортные операции и энергоснабжение

Неотъемлемой частью жизненного пути РЗЭ являются **транспортные операции**, особенно значима транспортировка концентратов металлов от места первичной переработки к месту глубокой переработки, как правило, осуществляемая с использованием железнодорожного или водного транспорта [36]. Так, о сложной логистике доставки химических реагентов в больших объемах для выщелачивания РЗЭ в контексте планируемого освоения Томторского месторождения (Якутия) пишет А.И. Матвеев с соавторами [37]. На этапе транспортировки на первый план выходит проблема выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферу.

Снабжение всех этапов жизненного цикла **электрической и тепловой энергией** также вносит серьезный вклад в общий уровень воздействия отрасли РЗЭ на окружающую среду. Важно отметить, что расход энергии в течение жизненного цикла РЗЭ значительно выше по сравнению с другими металлами [3].

Таким образом, жизненный цикл РЗЭ, получаемых из ископаемого сырья, включает большое количество технологических этапов, требующих значительного расхода материалов и энергии и приводящих к загрязнению окружающей среды. Ключевые экологические риски на основных этапах жизненного цикла РЗЭ сведены в таблице 1.

Таблица 1

Экологические риски по всем этапам жизненного цикла РЗЭ при их получении из первичного сырья

Технологические процессы	Факторы негативного/положительного воздействия на окружающую среду	Основные загрязнители
1. Начало жизненного цикла — добыча и обогащение РЗЭ		
1а. Получение РЗЭ из наземных минеральных отложений		
Карьерная добыча	— Отчуждение земель — Преобразование ландшафта, изменение уровня грунтовых вод, потеря биоразнообразия — Удаление почвенного слоя, растительности, эрозия почв — Отвалы вскрышных пород — Отвалы пустой породы — Карьерные воды — Большой расход энергии — Шум, вибрация — Изменение альбедо земной поверхности	— Выбросы в воздух: металлы, пыль и сопутствующие загрязняющие вещества, парниковые газы — Сточные воды: механические примеси, металлы, кислоты, щелочи, минеральные масла — Радиоактивные вещества
Шахтная добыча	— Нарушение недр, изменение уровня грунтовых вод, потеря биоразнообразия — Отвалы пустой породы — Шахтные, дренажные воды — Большой расход энергии — Шум, вибрация	
Добыча с использованием метода подземного выщелачивания (<i>in-situ leaching</i>)	— Минимизация удаления почвенного слоя, растительности, вскрышных пород — Нарушение недр — Буровые растворы — Большой расход энергии — Большой расход воды — Большой расход химикатов — Шум, вибрация	
Обогащение минерального сырья с получением концентратов РЗЭ и последующее выделение РЗЭ	— Измельчение/дробление — Хвостохранилища — Сточные воды — Шламохранилища (инфильтрация химикатов в окружающую среду) — Большой расход химикатов (кислот, щелочей, растворителей) — Большой расход энергии — Шум, вибрация — Риски для здоровья рабочих	— Выбросы в воздух: металлы, пыль и сопутствующие загрязняющие вещества, коррозионные фторсодержащие газы — Сточные воды: взвешенные вещества, органические вещества — Радиоактивные отходы
1б. Получение РЗЭ из морских минеральных отложений		
Добыча глубоководного ила и железомарганцевых конкреций со дна моря	— Не требуется удаление почвенного слоя и растительности — Не требуется сооружение наземной производственной и транспортной инфраструктуры — Не требуются удаление вскрышных пород и отвалы пород — Уплотнение осадочных пород при передвижении техники — Возмущение донного грунта и повторное осаждение осадков (формирование шлейфа взвесей) — Прямое уничтожение, захоронение донных сообществ живых организмов под слоем осадков, нарушение условий их обитания (снижение видового богатства, численности и биомассы бентоса) — Изменение химического состава морской воды, донных отложений — Большой расход энергии — Высокие риски химического загрязнения морской среды при авариях	— Выбросы в воздух от работы оборудования: кислотообразующие газы, парниковые газы, сажа — Загрязняющие вещества в воде: взвешенные вещества, тяжелые металлы, поверхностно-активные вещества, потенциальные разливы топлива — Радиоактивные вещества (концентрации ниже, чем на месторождениях суши)

Технологические процессы	Факторы негативного/положительного воздействия на окружающую среду	Основные загрязнители
Подъем сырья по вертикальному коллектору, обезвоживание ила и промывка конкреций (на судах)	— Образование шлейфов наносов вдоль трассы коллектора — Подъем донной воды с более высоким содержанием питательных веществ на поверхность, что может вызывать избыточное цветение водорослей и нарушить баланс пелагической экосистемы — Сброс сточных вод (после обезвоживания ила и промывки конкреций), содержащих механические примеси, в т. ч. токсичные, создание поверхностного плюма, повышение мутности воды (снижение проникновения света в водную толщу, нарушение фотосинтеза фитопланктона) — Очень большой расход энергии — Использование мазута в качестве топлива для судов — Риски аварий с выбросом токсичных веществ в окружающую среду	— Выбросы в воздух от работы оборудования: кислотообразующие газы, парниковые газы, сажа — Загрязняющие вещества в воде: взвешенные вещества, тяжелые металлы, потенциальные разливы топлив, органические вещества — Сточные воды: взвешенные вещества, тяжелые металлы
Обогащение минерального сырья с получением концентратов РЗЭ и последующее выделение РЗЭ	— Измельчение/дробление — Хвостохранилища — Сточные воды — Большой расход химикатов (кислот, щелочей, растворителей) — Большой расход энергии — Шум, вибрация — Риски для здоровья рабочих	— Выбросы в воздух: металлы, пыль и сопутствующие загрязняющие вещества, коррозионные фторсодержащие газы — Сточные воды: кислоты, щелочи, растворители, тяжелые металлы
2. Середина жизненного цикла — производство и использование продукции, содержащей РЗЭ		
Производство продукции, содержащей РЗЭ	— Выбросы от работы оборудования — Сточные воды — Образование отходов, включая шлаки — Расход энергии — Расход воды — Шум, вибрация — Риски аварий	— Выбросы в воздух: летучие органические соединения, кислотные пары, пыль, парниковые газы — Сточные воды: остатки кислот, щелочей, растворителей, тяжелые металлы, взвешенные вещества
Использование продукции, содержащей РЗЭ	— Преимущества, связанные с зеленой продукцией — Образование отходов, включая электронный лом — Рассеивание РЗЭ в окружающей среде	— Выбросы в воздух: РЗЭ (вследствие рассеяния) — Сточные воды: РЗЭ (локальные сбросы, например, при проведении медицинских исследований с применением контрастных веществ) — Отходы: РЗЭ, другие металлы, пластики, композитные материалы и пр.
3. Окончание жизненного цикла — обращение с отходами		
Сбор и обработка отходов, включая демонтаж продукции и разделение компонентов	— Измельчение/дробление — Образование отходов — Риски для здоровья рабочих — Большой расход энергии	— Выбросы в воздух: пыль, РЗЭ и другие металлы, летучие органические соединения — Сточные воды: взвешенные вещества, тяжелые металлы, остатки фторопластов с плат — Отходы: вторичные отходы разного состава
Переработка отходов	— Сбережение первичного сырья — Сточные воды — Образование отходов — Значительно меньшее образование радиоактивных отходов по сравнению с первичным производством — Большой расход химикатов (кислот, щелочей, растворителей) — Большой расход энергии	— Выбросы в воздух: кислотные пары, пыль — Сточные воды: кислоты, щелочи, растворы солей РЗЭ и тяжелых металлов, органические растворители — Отходы: вторичные отходы разного состава — Радиоактивные вещества: минимальное содержание
Захоронение отходов	— Неиспользуемый потенциал извлечения РЗЭ — Свалочный фильтрат — Свалочный газ — Риск долгосрочного загрязнения почв и грунтовых вод	— Выбросы в воздух: парниковые газы, летучие органические соединения — Сточные воды (фильтрат): тяжелые металлы, РЗЭ, соли

Технологические процессы	Факторы негативного/положительного воздействия на окружающую среду	Основные загрязнители
Сжигание отходов	— Неиспользуемый потенциал извлечения РЗЭ — Большой объем выбросов — Сточные воды системы очистки отходящих газов — Образование золы и шлаков	— Выбросы в воздух: металлы, летучие органические соединения, диоксины, кислые газы, мелкодисперсная зола — Сточные воды: высокоминерализованные с примесями тяжелых металлов, кислот
4. Сквозные операции в жизненном цикле		
Транспортировка	— Большой расход топлива — Выбросы загрязняющих веществ — Выбросы парниковых газов — Риски аварий, разливов	— Выбросы в воздух: кислотообразующие газы, парниковые газы, взвешенные частицы
Энергоснабжение	— Выбросы парниковых газов при выработке энергии для всех этапов жизненного цикла посредством сжигания топлива — Тепловое воздействие	— Выбросы в воздух: кислотообразующие газы, парниковые газы, тяжелые металлы, зола

Составлено по данным [2–3; 38–41]

В таблицу не включены риски, связанные с такими вспомогательными процессами, как многотоннажное производство химических реагентов для добычи и обогащения РЗЭ, производство оборудования и упаковочных материалов.

Получение РЗЭ из вторичного сырья (переработка содержащих РЗЭ отходов)

Говоря о переработке отходов с целью извлечения из них РЗЭ, отходы можно отнести к возобновляемым ресурсам (согласно п. 4.2 ГОСТ Р 52104-2003 это часть природных ресурсов в пределах круговорота веществ в биосфере, способная к самовосстановлению в сроки, соизмеримые со сроками хозяйственной деятельности человека). Эти ценные ресурсы должны быть возвращены в промышленное использование. Деятельность по получению ценных компонентов из накопленных в городах отходов известна под названием «городской добычи» (urban mining).

В настоящее время существуют технологии получения РЗЭ из таких видов **отходов производства** как отвалы горнодобывающих предприятий и обогащательных предприятий, в первую очередь, ведущих добычу металлических руд и фосфатного сырья, золошлаки угольных электростанций, зола МСЗ, лом и стружка, образующиеся в процессе производства неодимовых магнитов и другой продукции из РЗЭ, а также из таких видов **отходов потребления** (из потребительских товаров в конце срока службы) как использованные магниты, аккумуляторы, осветительные приборы, отработанные катализаторы и пр. Неиспользованные, непроданные товары с истекшим сроком годности, отходы, захороненные на полигонах производственных и коммунальных отходов с этой точки зрения также представляют интерес (табл. 2).

В первую очередь, представляют интерес РЗЭ, накопленные в отвалах горнодобывающих и обогащательных предприятий. Эти отходы возникли тогда, когда концентрации РЗЭ, по сегодняшним меркам представляющие ценность, считались низкими [43]. К примеру, фосфогипсовые отходы — побочный продукт переработки хибинских апатитов, исходно содержащих до 1 % РЗЭ по массе [44; 45]. Извлечение РЗЭ возможно также из таких отходов сернокислотной переработки апатитовых руд как экстракционная фосфорная кислота, оборотная фосфорная кислота и остаток после получения упаренной фосфорной кислоты; в России планируется начать извлечение РЗЭ в промышленных масштабах из фосфогипса и экстракционной фосфорной кислоты.¹

¹ Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году [электронный ресурс] — режим доступа: https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvenny_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/ (дата обращения: 20.09.2025).

Таблица 2

Вторичные ресурсы РЗЭ

Вид отхода	РЗЭ, содержащиеся в составе отхода
Отвалы горнодобывающих и обогащательных предприятий, включая отходы переработки фосфатного сырья	Широкий спектр РЗЭ (например, Ce, La, Nd в бастнезите; Y, тяжелые РЗЭ в ксенотиме; Y, Ce, Nd, Sm в фосфогипсе)
Отходы и остатки переработки: отходы пиromеталлургии (обжига, спекания, плавки), шламы очистки сточных вод и пр.	Все РЗЭ, особенно Ce, La, критические РЗЭ (Y, Nd, Eu, Tb, Dy).
Золошлаки угольных электростанций	Скандий, La, Ce, Nd, Y
Зола МСЗ	Широкий спектр РЗЭ из электроники, стекла, магнитов и катализаторов, содержащихся в твердых коммунальных отходах
Лом и стружка, образующиеся в процессе производства высокоэнергетических постоянных магнитов, бракованные магниты, использованные магниты	Nd, Dy, Tb, Pr, Sm, иногда Gd
Отработанные катализаторы крекинга нефтяного сырья	Ce, La
Отработанные никельметалл-гидридные аккумуляторы	La, Ce, Nd, Pr
Отработанные электрические двигатели оборудования и транспортных средств, гибридные двигатели (в составе магнитов)	Nd, Dy, Pr
Ветряные турбогенераторы (в составе магнитов)	Nd, Dy, La, Pr, Tb
Отработанные люминофоры, люминесцентные лампы, жидкокристаллические и плазменные дисплеи	Eu, Tb, Y, Ce, Gd, La
Отработанные электронно-лучевые трубки	Eu, Y
Отработанные светодиоды	Ce, Y, иногда Eu, Gd
Отработанное оптоволокно	Er
Оптические стекла, стекла «умных» зданий, солнцезащитные очки	Er, La
Стекланные полирующие порошки	Ce
Использованные зажигалки для сигарет	Ce, La
Отходы, захороненные на полигонах производственных и коммунальных отходов	Все РЗЭ

Составлено на основе [2; 42]

Отходы потребления менее однородны по составу по сравнению с производственными отходами, загрязнены разнообразными примесями. Однако они тоже могут иметь концентрации РЗЭ, оправдывающие финансовые вложения в их сбор и переработку. Зачастую концентрации РЗЭ в них даже выше, чем в отходах производства. Например, содержание диспрозия в магнитах для гибридных автомобилей и электрокаров составляет 8,7 %, для волноводов — 6,4 %, для систем хранения данных, реле и переключателей, ветровых турбин — 4,1 % [1]. В некоторых странах уже осуществляется получение РЗЭ из неодимовых магнитов из электронных устройств (концентрации неодима в них могут достигать 30 %, концентрации диспрозия — 10 %), люминесцентных ламп, никель-металлгидридных аккумуляторов [45]. И объем отходов потребления весьма значителен. К примеру, в России только электронного лома образуется порядка 1,631 тыс. т в год.² Таким образом, в условиях разрыва между уровнем производства и уровнем спроса на РЗЭ возможность их извлечения из отходов потребления нельзя сбрасывать со счетов.

Добыча РЗЭ из отходов, определенно, связана с рядом положительных экологических аспектов.

² В. Форти, К.П. Балде, Р. Кюр, Г. Бель: Глобальный мониторинг электронных отходов, 2020 год: объемы, потоки и потенциал циркуляционной экономики. Программа SCYCLE под эгидой Университета Организации Объединенных Наций (УООН) / Учебного и научно-исследовательского института Организации Объединенных Наций (ЮНИТАР), Международный союз электросвязи (МСЭ) и Международная ассоциация по твердым отходам (МАТО). Бонн/Женева/Роттердам.

Во-первых, за счет освоения вторичных ресурсов экономится природное сырье и снижается зависимость экономики от первичного сырья, в том числе импортируемого. Потребление РЗЭ в России, перекрываемое, большей частью, за счет импорта, по данным на 2018 г. составляет 1 200 т в пересчете на оксиды РЗЭ. 70 % всех РЗЭ потребляется электроникой, сотни тонн РЗЭ идут на катализаторы для нефтепереработки, более 100 т — на постоянные магниты, около 40 т — на оптическое стекло и оптику. Спрос в других отраслях меняется от нескольких тонн до нескольких десятков тонн в год.³

Во-вторых, при извлечении РЗЭ из вторсырья практически исключается такой фактор, как нарушение земель (предотвращается выбытие сельскохозяйственных угодий из оборота, ущерб земельным и лесным ресурсам, что позволяет сохранить биоразнообразие). Более того, за счет сокращения площадей, занятых хвостохранилищами, высвобождаются земельные участки и снижается выброс пыли в атмосферу.

В-третьих, важно отметить, что в России большинство природных месторождений РЗЭ приурочены к удаленным от промышленных потребителей, труднодоступным территориям со слабо развитой инфраструктурой, экологический ущерб при их освоении очень высок. В то время как техногенные месторождения, особенно полигоны твердых коммунальных отходов (ТКО), приурочены к крупным городам, в которых есть спрос на РЗЭ. То есть при добыче РЗЭ из отходов предотвращаются экологические риски, связанные с сопутствующим освоением новых территорий.

В-четвертых, если добыча и переработка первичных РЗЭ в большинстве случаев связана с радиоактивным излучением, то при получении РЗЭ из вторичного сырья данная проблема не стоит. В частности, если говорить о российских редкоземельных месторождениях, в большинстве своём руды радиоактивны.¹

В-пятых, при захоронении отходов, содержащих РЗЭ, происходит их миграция в почвы и водные объекты территорий, прилегающих к объектам захоронения отходов. Благодаря извлечению РЗЭ из отходов поступление токсичных РЗЭ в окружающую среду значительно снижается.

В-шестых, смеси РЗЭ, входящие в состав вторсырья, например магнитов и люминофоров, более простые по составу, по сравнению со смесями РЗЭ, встречающимися в природе, поэтому их разделение требует меньшего расхода энергии и химических веществ [1]. Этот фактор особенно важен для России потому, что большая часть наших запасов РЗЭ относится к труднообогатимым.³

В-седьмых, при добыче РЗЭ из первичного сырья возникает «проблема баланса». За счет неравного содержания различных РЗЭ в горных породах наблюдается перепроизводство РЗЭ, спрос на которые ограничен (в частности, La, Ce), и нехватка «критических РЗЭ» (Y, Nd, Eu, Tb, Dy). Поэтому переработка отходов, содержащих РЗЭ, например, неодимовых магнитов, может сократить общее количество руд РЗЭ, которые необходимо извлечь из первичных источников [1].

Что касается **негативных эффектов загрязнения окружающей среды**, методы извлечения РЗЭ из отходов разнообразны (механические, химические, термические, менее распространенные биологические), их воздействие на окружающую среду неодинаково (табл. 3).

³ Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 24–2020 «Производство редких и редкоземельных металлов» (утв. приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23.12.2020 № 2185).

Таблица 3

Экологические риски при получении РЗЭ из вторичного сырья

Метод переработки	Применяемое вторсырье	Уровень и факторы НВОС, уровень энергопотребления	Возможность извлечения РЗЭ из отходов переработки
Физико-механические методы (обогащение посредством дробления, грохочения, магнитной сепарации, электростатическая сепарация)	Отходы хвостохранилищ, электродвигатели, крупнокусковые электронные отходы (целые жесткие диски и т. п.), постоянные магниты, катализаторы, аккумуляторы	Уровень НВОС — средний: — выбросы пыли, содержащей РЗЭ и тяжелые металлы — шумовое загрязнение Уровень энергозатрат — умеренный	Мелкие фракции и пыль могут содержать РЗЭ, их извлечение требует применения химических методов.
Гидрометаллургия (выщелачивание кислотами, щелочами, экстракция растворителями, ионообменная сорбция)	Фосфогипс, золошлаки, шлаки МСЗ, никель-металлгидридные аккумуляторы, постоянные магниты (от электродвигателей, жестких дисков, наушников), катализаторы, печатные платы и другие электронные отходы, люминофоры	Уровень НВОС — высокий: — сточные воды и шламы, содержащие тяжелые металлы и кислоты — высокий риск утечек и загрязнения почвы и природных вод — использование большого количества химических реагентов, риски их утечек Уровень энергозатрат — умеренный	Хвосты выщелачивания содержат остатки РЗЭ, но их извлечение сложное из-за низкой концентрации.
Пирометаллургия (плавка, восстановительная плавка, хлорирование)	Шлаки, отходы производства магнитов, отработанные магниты, аккумуляторы, люминесцентные лампы	Уровень НВОС — высокий: — большие выбросы парниковых и токсичных газов, в том числе хлорорганических соединений — большие количества твердых отходов Уровень энергозатрат — высокий (температуры 1 000–1 500°C)	Шлаки после плавки могут содержать остатки РЗЭ, их извлечение требует применения химических методов.
Биотехнологии (биовыщелачивание с использованием бактерий, грибов и продуктов их метаболизма)	Фосфогипс, отходы хвостохранилищ (включая бедные и сложные отходы, переработка которых традиционными методами нерентабельна), зольная пыль от сжигания угля, низкосортные электронные отходы	Уровень НВОС — низкий/средний: — органические отходы (биошламы) — сточные воды (менее токсичные, чем при использовании гидрометаллургии) и риск их утечек — риск неконтролируемого распространения микроорганизмов Уровень энергозатрат — низкий	Остатки биомассы и сточные воды могут содержать следы РЗЭ, их извлечение пока не отработано.

Составлено по данным [1; 3]

Переработка отходов горнодобывающей деятельности и отходов обогащения руд РЗЭ, как правило, осуществляется в том же месте, что и добыча руд, с использованием тех же процессов и оборудования, и приводит к образованию тех же загрязняющих веществ, что и при переработке исходной руды.⁴ Процессы переработки отходов потребления также оказывают НВОС, причем особо следует учитывать сложности сбора, демонтажа и транспортировки отходов потребления. Во-первых, они требуют значительного расхода энергии и влекут за собой выбросы в атмосферный воздух. А во-вторых, при контакте с отходами возникают риски попадания вредных веществ в организм работников через кожу и ингаляционно [41].

Таким образом, сам процесс извлечения РЗЭ из отходов также генерирует остаточные твердые отходы, стоки и выбросы в воздушную среду, в том числе выбросы парниковых газов, связанные с генерацией энергии. Кроме того, немалый вклад в общий уровень НВОС вносят применение химикатов, больших объемов воды, использование транспорта. Особо высокий

⁴ Rare Earth Elements: A Review of Production, Processing, Recycling, and Associated Environmental Issues. EPA/600/R12/572. Washington: United States Environmental Protection Agency, 2012. — 135 p. — URL: https://miningwatch.ca/sites/default/files/epa_ree_report_dec_2012.pdf (дата обращения: 12.09.2025).

уровень НВОС при переработке отходов наблюдается на небольших производствах с примитивными технологиями, распространенных во многих странах.

Дискуссия

Как показал проведенный анализ, на всех этапах жизненного цикла РЗЭ возникают экологические риски. Фокус исследования заключается в сопоставлении уровня НВОС при извлечении РЗЭ из минерального сырья и из вторичного сырья.

Настоящее исследование показало, что **добыча РЗЭ из природных источников на суше** сопряжена с такими экологическими проблемами как истощение природных ресурсов, потенциальная радиоактивность, подкисление окружающей среды, эвтрофикация, образование твердых отходов, большой расход воды, потребление первичной энергии, токсичность. Причем эти воздействия проявляются на региональном и глобальном уровнях, и могут привести к деградации наземных экосистем.

Добыча РЗЭ из глубоководных илов и железомарганцевых конкреций вызывает изменения дна моря, толщи и поверхностных слоев воды. Загрязняющие вещества при морской добыче во многом аналогичны тем, что характерны для наземной добычи (металлы, химикаты), но их среда распространения иная. Также добавляется такой фактор воздействия, как образование осадочных шлейфов, являющихся основным способом распространения загрязнителей (за счет морских течений). Как следствие, воздействие морской добычи чрезвычайно сложно контролировать и сдерживать, поэтому оно проявляется на обширных территориях за пределами зоны добычи.

Также следует отметить, что ввиду технологических трудностей и экологических ограничений добыча РЗЭ из морских источников пока ограничивается экспериментальными проектами. Поэтому на данный момент трудно дать надежные прогнозы долгосрочного воздействия морской добычи РЗЭ на глубоководные экосистемы, необходимо более глубокое его понимание [12].

Технологии извлечения РЗЭ **из морской воды** едва ли будут конкурентоспособны в ближайшие десятилетия.

Вместе с тем **добыча РЗЭ из вторсырья** оказывает меньшее негативное воздействие на окружающую среду по сравнению с их добычей из природных источников. В первую очередь, важна количественная оценка уровня выбросов, сбросов и образования отходов. Специалисты сходятся во мнении, что переработка РЗЭ обеспечит значительные преимущества по сравнению с первичной переработкой в отношении выбросов в атмосферу, защиты подземных вод, подкисления, эвтрофикации и защиты климата.⁵

Уменьшить уровень НВОС при извлечении РЗЭ из отходов можно через оптимизацию технологий в части сокращения потребления кислоты (в гидрометаллургии) и энергии (во всех технологических операциях). Другие важные сферы повышения эффективности восстановления РЗЭ из отходов потребления — разработка продукта с учетом экологических аспектов, в частности проектирование продукта таким образом, который облегчает восстановление из него ценных компонентов в будущем, а также выстраивание эффективной системы сбора

⁵ Rare Earth Elements: A Review of Production, Processing, Recycling, and Associated Environmental Issues. EPA/600/R12/572. Washington: United States Environmental Protection Agency, 2012. — 135 p. — URL: https://miningwatch.ca/sites/default/files/epa_ree_report_dec_2012.pdf (дата обращения: 12.09.2025).

Schüler D., Buchert M., Liu R., Dittrich St., Merz C. Study on Rare Earths and Their Recycling. Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament. Darmstadt: Öko-Institut e.V., 2011. — 162 p.

потребительских отходов. Необходимо наладить отдельный сбор наиболее распространенных видов отходов, содержащих высокие концентрации РЗЭ (отходов электроники, оргтехники, осветительных приборов).

Следует отметить также и то, что помимо решения технических трудностей для организации стабильно функционирующей отрасли переработки содержащих РЗЭ отходов необходимо понимание того, сколько таких отходов образуется в России. Как отмечает М.А. Ястребинский, разработка техногенных месторождений требует наличия объективной информации о качественно-количественном состоянии объекта, в том числе о результатах геохимических лабораторных исследований, объемах запасов, технологиях извлечения полезных компонентов [43].

Ограничения исследования

В настоящем исследовании не учитывался вопрос стоимости извлечения РЗЭ из отходов. Чаще всего, исследователи говорят о том, что экономически более выгодно получение РЗЭ из первичного сырья [46]. Однако, по мере роста цен на РЗЭ вопрос экономической целесообразности извлечения РЗЭ из вторичных источников требует пересмотра.

Заключение

В настоящее время РЗЭ в составе различной продукции преимущественно оканчивают свой жизненный цикл на объектах размещения отходов (от хвостохранилищ, приуроченных к горно-обогатительным комбинатам, до полигонов промышленных и коммунальных отходов). Разработка способов их извлечения из хранилищ отходов для последующего использования представляет собой актуальную научную задачу. В частности, важна сравнительная оценка ресурсной и экологической эффективности извлечения РЗЭ из первичных и вторичных источников.

Извлечение РЗЭ из вторичного сырья способно обеспечить двойной положительный эффект — сокращение нагрузки на экосистемы и получение сырья для развития промышленности за счет более замкнутых цепочек поставок. С учетом этого фактора, а также в связи с дефицитом РЗЭ на рынке извлечение РЗЭ из вторичного сырья представляется экологически оправданным, особенно если речь идет о производственных отходах, и во вторую очередь — об отходах использования потребительских товаров.

Многие потребительские товары, содержащие РЗЭ, выпущены на рынок недавно и имеют длительный срок службы (например, солнечные элементы, ветряные турбины, электродвигатели автомобилей, жидкокристаллические дисплеи). Отходы их использования появятся через одно или несколько десятилетий. Таким образом, сырьевая база переработки со временем будет увеличиваться.

Переработку отходов, содержащих РЗЭ, необходимо начинать уже сейчас, обеспечивая переход от успешных лабораторных исследований к широкому промышленному внедрению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Binnemans K. Recycling of rare earths: a critical review / K. Binnemans, P.T. Jones, B. Blanpain, T. Van Gerven, Y. Yang, A. Walton, M. Buchert. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.12.037 // Journal of Cleaner Production. — 2013. — № 51. — P. 1–22. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652612006932?via%3Dihub> (дата обращения: 09.09.2025).

2. Weng Z. Assessing rare earth element mineral deposit types and links to environmental impacts / Z. Weng, S. Jowitt, G. Mudd, N. Haque. — DOI: 10.1179/1743275813Y.000000036 // Applied Earth Science. — 2013. — Т. 122. — № 2. — P. 83–96. — URL: https://www.researchgate.net/publication/259571924_Assessing_rare_earth_element_mineral_deposit_types_and_links_to_environmental_impacts (дата обращения: 09.09.2025).
3. Haque N. Rare Earth Elements: Overview of Mining, Mineralogy, Uses, Sustainability and Environmental Impact / N. Haque, A. Hughes, S. Lim, C. Vernon. — DOI: 10.3390/resources3040614 // Resources. — 2014. — № 3. — P. 614–635. — URL: <https://www.mdpi.com/2079-9276/3/4/614> (дата обращения: 09.09.2025).
4. Олькова А.С. Источники, токсичность и биоаккумуляция редкоземельных элементов в окружающей среде: обзор / А.С. Олькова, М.А. Сысолятина. — DOI: 10.25750/1995-4301-2024-1-019-030 // Теоретическая и прикладная экология. — 2024. — № 1. — С. 19–30. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=65311843> (дата обращения: 09.09.2025).
5. Захаров И.С. К вопросу об экологической опасности редкоземельных металлов / И.С. Захаров, Л.В. Контрош, А.В. Храмов, О.И. Шумилов // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. — 2018. — № 8. — С. 91–97. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=ynmjwx> (дата обращения: 09.09.2025).
6. Семенова М.И. Биотехническая система оценки токсичности соединений редкоземельных металлов / М.И. Семенова, А.В. Смирнов, А. Соколов, А.С. Ковалевская, О.В. Смолова. — DOI: 10.23947/2541-9129-2020-4-56-67 // Безопасность техногенных и природных систем. — 2020. — № 4. — С. 56–67. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44287881> (дата обращения: 10.09.2025).
7. Hanana H. Insights on the toxicity of selected rare earth elements in rainbow trout hepatocytes / H. Hanana, J. Kowalczyk, C. André, F. Gagné. — DOI: 10.1016/j.cbpc.2021.109097 // Comparative Biochemistry and Physiology. Part C: Toxicology & Pharmacology. — 2021. — № 248. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34090975/> (дата обращения: 10.09.2025).
8. Navarro J. Life-cycle assessment of the production of rare-earth elements for energy applications: a review / J. Navarro, F. Zhao. — DOI: 10.3389/fenrg.2014.00045 // Frontiers in Energy Research 2 (Suppl. 1). — 2014. — № 2. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2014.00045/full> (дата обращения: 10.09.2025).
9. Kato Y. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements / Y. Kato, K. Fujinaga, K. Nakamura, Y. Takaya, K. Kitamura, J. Ohta, R. Toda, T. Nakashima, H. Iwamori. — DOI: 10.1038/ngeo1185 // Nature Geoscience. — 2011. — № 4. — P. 535–539. URL: <https://www.nature.com/articles/ngeo1185> (дата обращения: 11.09.2025).
10. Bao Z. Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China / Z. Bao, Z. Zhao. — DOI: 10.1016/j.oregeorev.2007.03.005 // Ore Geology Reviews. — 2008. — № 33. — P. 519–535. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169136807000741> (дата обращения: 11.09.2025).
11. Takaya Y. The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements / Y. Takaya, K. Yasukawa, T. Kawasaki, et al. — DOI: 10.1038/s41598-018-23948-5 // Scientific Reports. — 2018. — № 8. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-23948-5> (дата обращения: 11.09.2025).

12. Hein J.R. Deep-ocean polymetallic nodules as a resource for critical materials // J.R. Hein, A. Koschinsky, T. Kuhn. — DOI: 10.1038/s43017-020-0027-0 // Nature Reviews Earth & Environment. — 2020. — № 1(3). — P. 158–169. URL: <https://www.nature.com/articles/s43017-020-0027-0> (дата обращения: 12.09.2025).
13. Kuhn T. Composition, Formation, and Occurrence of Polymetallic Nodules // T. Kuhn, A. Węgorzewski, C. Rühlemann, A. Vink. — DOI: 10.1007/978-3-319-52557-0_2 // Deep-Sea Mining. — 2017. — P. 23–63. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-52557-0_2 (дата обращения: 12.09.2025).
14. Hong S. Deep-Sea Mining: Current Status and Future Considerations // S. Hong, et al. — DOI: 10.1007/978-3-030-12696-4_5 // Environmental Issues of Deep-Sea Mining. — 2019. — P. 95–143. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-12696-4_5 (дата обращения: 12.09.2025).
15. Kuhn T. Tiefseeförderung von Manganknollen // T. Kuhn, C. Rühlemann, A. Vink. // Schiff & Hafen. — 2011. — № 5. — P. 78–83. URL: <https://www.schiffundhafen.de/archiv/> (дата обращения: 12.09.2025).
16. Atmanand M.A. Concepts of Deep-Sea Mining Technologies // M.A. Atmanand, G.A. Ramadass. — DOI: 10.1007/978-3-319-52557-0_11 // Deep-Sea Mining. — 2017. — P. 305–343. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-52557-0_11 (дата обращения: 12.09.2025).
17. Van Dover C.L. Biodiversity loss from deep-sea mining / C.L. Van Dover, J.A. Ardron, E. Escobar, et al. — DOI: 10.1038/ngeo2983 // Nature Geoscience. — 2017. — № 10(7). — P. 464–465. URL: <https://www.nature.com/articles/s43017-020-0027-0> (дата обращения: 12.09.2025).
18. Sharma R. Environmental issues of deep-sea mining / R. Sharma. — DOI: 10.1016/j.proeps.2015.06.026 // Procedia Earth and Planetary Science. — 2015. — № 11. P. 204–211. URL: https://www.researchgate.net/publication/279460069_Environmental_Issues_of_Deep-Sea_Mining (дата обращения: 13.09.2025).
19. Elderfield H. The rare earth elements in seawater / H. Elderfield, M.J. Greaves. — DOI: 10.1038/296214a0 // Nature. — 1982. — № 296(5854). — P. 214–219. URL: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2075845> (дата обращения: 13.09.2025).
20. Zhao F. EDTA-Cross-Linked β -Cyclodextrin: An Environmentally Friendly Bifunctional Adsorbent for Simultaneous Adsorption of Metals and Cationic Dyes / F. Zhao, E. Repo, D. Yin, Y. Meng, S. Jafari, M. Sillanpää. — DOI: 10.1021/acs.est.5b02227 // Environmental Science & Technology. — 2015. — № 49(17). — P. 10570–10580. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26237660/> (дата обращения: 13.09.2025).
21. Arshi P.S. Behind the Scenes of Clean Energy: The Environmental Footprint of Rare Earth Products / P.S. Arshi, E. Vahidi, F. Zhao. — DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b03484 // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. — 2018. — № 6(3). — P. 3311–3320. — URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.7b03484> (дата обращения: 14.09.2025).
22. Du X. Uncovering the Global Life Cycles of the Rare Earth Elements / X. Du, T. Graedel. — DOI: 10.1038/srep00145 // Scientific reports. — 2011. — № 1. URL: <https://www.nature.com/articles/srep00145> (дата обращения: 14.09.2025).

23. Баканач М.О. Проблемы развития отечественного рынка ломов и отходов драгоценных и редкоземельных металлов / М.О. Баканач, А.А. Зыков. — DOI: 10.34670/AR.2023.55.88.040 // Экономика: вчера, сегодня, завтра. — 2023. — Т. 13. — № 6-1. — С. 344–351. URL: <http://publishing-vak.ru/file/archive-economy-2023-6/b33-bakanach-zykov.pdf> (дата обращения: 14.09.2025).
24. Lyubomirova V. Fractionation of traffic-emitted Ce, La and Zr in road dusts / V. Lyubomirova, R. Djingova, J. Elteren. — DOI: 10.1039/c1em10187k // Journal of Environmental Monitoring. — 2011. — № 13. — P. 1823–1830. — URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/em/c1em10187k> (дата обращения: 16.09.2025).
25. Sun G. Rare earth elements in street dust and associated health risk in a municipal industrial base of central China / G. Sun, Z. Li, T. Liu, J. Chen, T. Wu, X. Feng. — DOI: 10.1007/s10653-017-9982-x // Environmental Geochemistry and Health. — 2017. — № 39(6). — P. 1469–1486. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-017-9982-x> (дата обращения: 16.09.2025).
26. Ali-Taleshi M.S. Road dusts-bound elements in a major metropolitan area, Tehran (Iran): Source tracking, pollution characteristics, ecological risks, spatiotemporal and geochemical patterns // M.S. Ali-Taleshi, S. Feiznia, A. Bourliva, S. Squizzato. — DOI: 10.1016/j.uclim.2021.100933 // Urban Climate. — 2021. — №39. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095521001632?via%3Dihub> (дата обращения: 16.09.2025).
27. Tepe N. High-technology metals as emerging contaminants: Strong increase of anthropogenic gadolinium levels in tap water of Berlin, Germany, from 2009 to 2012 / N. Tepe, M. Romero, M. Bau. — DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.04.006 // Applied Geochemistry. — 2014. — № 45. — P. 191–197. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292714000791?via%3Dihub> (дата обращения: 18.09.2025).
28. Suzuki Y. Cycling of rare earth elements in the atmosphere in central Tokyo / Y. Suzuki, S. Hikida, N. Furuta. — DOI: 10.1039/c1em10590f // Journal of Environmental Monitoring. — 2011. — № 13. — URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/em/c1em10590f> (дата обращения: 18.09.2025).
29. Carpenter D. Uptake and Effects of Six Rare Earth Elements (REEs) on Selected Native and Crop Species Growing in Contaminated Soils / D. Carpenter, C. Boutin, J.E. Allison, J.L. Parsons, D.M. Ellis. — DOI: 10.1371/journal.pone // PLOS One. — 2015. — № 10(6). — P. 0129936–0129936. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0129936> (дата обращения: 18.09.2025).
30. Ramos S.J. Rare earth elements in the soil environment / S.J. Ramos. — DOI: 10.1007/s40726-016-0026-4 // Current Pollution Reports. — 2016. — № 1. — С. 28–50. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40726-016-0026-4> (дата обращения: 18.09.2025).
31. Adeel M. Cryptic footprints of rare earth elements on natural resources and living organisms / M. Adeel, J.Y. Lee, M. Zain, M. Rizwan, A. Nawab, et al. — DOI: 10.1016/j.envint.2019.03.022 // Environment International. — 2019. — № 127. — P. 785–800. (дата обращения: 18.09.2025).

32. Iqbal F. Degradation of phosphor-in-glass encapsulants with various phosphor types for high power LEDs // F. Iqbal, S. Kim, H. Kim. — DOI: 10.1016/j.optmat.2017.06.024 // Optical Materials. — 2017. — № 72. — P. 323–329. — URL: https://www.academia.edu/98648384/Degradation_of_phosphor_in_glass_encapsulants_with_various_phosphor_types_for_high_power_LEDs (дата обращения: 18.09.2025).
33. Wehbie M. Characterization of end-of-life LED lamps: Evaluation of reuse, repair and recycling potential // M. Wehbie, V. Semetey. — DOI: 10.1016/j.wasman.2022.01.039 // Waste Management. — 2022. — № 141. — P. 202–207. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X22000460> (дата обращения: 18.09.2025).
34. Максимова А.М. Извлечение редких и редкоземельных металлов из техногенных объектов как путь к рациональному освоению недр / А.М. Максимова // Интернет-журнал Науковедение. — 2016. — Т. 8. — № 5(36). — С. 43. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27440724> (дата обращения: 19.09.2025).
35. Holm O. Innovative treatment trains of bottom ash (BA) from municipal solid waste incineration (MSWI) in Germany / O. Holm, F.-G. Simon. — DOI: 10.1016/j.wasman.2016.10.049 // Waste Management. — 2017. — № 59. — P. 229–236. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27625178/> (дата обращения: 19.09.2025).
36. A. Golev. Rare earths supply chains: Current status, constraints and opportunities / A. Golev, M. Scott, P.D. Erskine, S.H. Ali, G.R. Ballantyne. — DOI: 10.1016/j.resourpol.2014.03.004 // Resources Policy. — 2014. — № 41. — P. 52–59. — URL: <https://2024.sci-hub.box/2395/49a7ec88dca345b4cc79b7356cc56a51/golev2014.pdf> (дата обращения: 19.09.2025).
37. Матвеев А.И. Схема создания редкометалльного кластера в Республике Саха (Якутия) / А.И. Матвеев, А.В. Толстов, И.М. Петров. — DOI 10.31242/2618-9712-2025-30-1-7-27 // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. — 2025. — Т. 30. — № 1. — С. 7–27. — URL: <https://resar.elpub.ru/jour/article/view/769> (дата обращения: 19.09.2025).
38. Koltun P. Life Cycle Impact of Rare Earth Elements, International / P. Koltun, A. Tharumarajah. — DOI 10.1155/2014/907536 // Scholarly Research Notices. — 2014. — 907536. — 10 pages. — URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2014/907536> (дата обращения: 19.09.2025).
39. Charalampides G. Environmental Defects and Economic Impact on Global Market of Rare Earth Metals / G. Charalampides, K. Vatalis, V. Karayannis, A. Baklavaridis. — DOI 10.1088/1757-899X/161/1/012069 // 20th Innovative Manufacturing Engineering and Energy Conference (IManEE 2016) / Kozani, Greece, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/161/1/012069/pdf> (дата обращения: 20.09.2025).
40. Rim K. Effects of rare earth elements on the environment and human health: A literature review // K. Rim. — DOI: 10.1007/s13530-016-0276-y // Toxicology and Environmental Health Sciences. — 2016. — № 8. — P. 189–200. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13530-016-0276-y> (дата обращения: 20.09.2025).
41. Yin X. The potential environmental risks associated with the development of rare earth element production in Canada // X. Yin, C. Washbourne, C. Beck, E. Poisson. — DOI:

- 10.1139/er-2020-0105 // Environmental Reviews. — 2021. — № 29(3). — P. 354–377. — URL: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/er-2020-0115> (дата обращения: 20.09.2025).
42. Golroudbary S.R. Global environmental cost of using rare earth elements in green energy technologies // S.R. Golroudbary, et al. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155022 // Science of the Total Environment. — 2022. — № 832. — P. 155022. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722021155> (дата обращения: 20.09.2025).
43. Ястребинский М.А. Разработка эколого-экономической классификации техногенных вторичных ресурсов, содержащих цветные, драгоценные металлы и редкоземельные элементы / М.А. Ястребинский // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2013. — № 1. — С. 319–328. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20206965> (дата обращения: 20.09.2025).
44. Локшин Э.П. «Зелёные» технологии извлечения РЗЭ при сернокислотной переработке Хибинского апатитового концентрата на минеральные удобрения / Э.П. Локшин, О.А. Тареева // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Тезисы докладов в 5 томах, Екатеринбург, 26–30 сентября 2016 г. Г. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2016. — С. 183.
45. Черный С.А. Вторичные ресурсы редкоземельных металлов / С.А. Черный. — DOI 10.18412/1816-0395-2020-9-44-50 // Экология и промышленность России. — 2020. — Т. 24. — № 9. — С. 44–50. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43880844> (дата обращения: 20.09.2025).
46. Ali S.H. Social and Environmental Impact of the Rare Earth Industries / S.H. Ali. — DOI: 10.3390/resources3010123 // Resources. — 2014. — № 3(1). — P. 123–134. — URL: <http://mdpi.com/2079-9276/3/1/123> (дата обращения: 20.09.2025).

Prituzhalova Olga Alexandrovna

University of Tyumen, Tyumen, Russia

E-mail: o.a.prituzhalova@utmn.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0720-9793>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=891523

Zhovanik Ilya Alexandrovich

University of Tyumen, Tyumen, Russia

E-mail: i.a.zhovanik@utmn.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9233-4782>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1228798

Zhovanik Yuliya Viktorovna

University of Tyumen, Tyumen, Russia

E-mail: y.v.zhovanik@utmn.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4512-0788>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1194928

Extraction of rare earth elements from terrestrial and marine mineral sediments and waste: an environmental impact assessment

Abstract. In the context of the scarcity of rare earth elements on the market, the question arises regarding the environmental feasibility of their extraction from secondary raw materials. The objective of this article is to compare the levels of negative environmental impact associated with the extraction of rare earth elements from primary and secondary raw materials, considering their entire life cycle.

Through a systematic analysis of data from current scientific literature, the key ecological risks characteristic of extracting rare earth elements from different types of raw materials have been identified. In terrestrial mining, the greatest risks stem from landscape transformation and chemical pollution of the environment. Concerns are raised by the radioactivity of primary raw materials, the formation of waste rock dumps and tailings storage facilities, emissions of dust and acid gases, and discharges of suspended solids, metals, acids, and alkalis in wastewater. Marine extraction of rare earth elements from deep-sea sediments and ferromanganese nodules involves the same polluting substances but affects different recipient objects. Primarily, it threatens the destruction of unique deep-sea ecosystems and impacts the water column and surface layers. Moreover, the zone of impact on the marine environment is significantly more extensive than in terrestrial mining, due to the formation of suspension plumes. Additionally, there is a lack of experience in mitigating impacts and reclaiming marine ecosystems at great depths. Extraction of rare earth elements from production and consumption waste offers several ecological advantages: the absence of radioactivity issues, the proximity of raw material sources to major cities, and a reduction in waste burial volumes. Furthermore, obtaining rare earth metals from waste helps to decrease the volumes of mineral extraction (and associated ecological risks), reduce dependence on raw material imports, and balance the market by alleviating shortages of critical rare earth elements.

Keywords: rare earth elements; environmental impact; recycling; urban mining; sustainable development; circular economy; resource saving