



И.Ю. Козловская,
кандидат технических наук

Современные подходы к извлечению редкоземельных элементов из отходов

Редкоземельные элементы (РЗЭ) — ключевой компонент современных высокотехнологичных изделий (от электроники до возобновляемой энергетики). Однако их добыча и переработка сопряжены с геополитическими и экологическими вызовами.

За последние 10 лет во всем мире существенно возрос интерес к извлечению РЗЭ из отходов и вторичного сырья. Это обусловлено стремлением снизить зависимость от ограниченных природных источников и крупного монополиста Китая, а также уменьшить экологический ущерб от их добычи. В статье рассматриваются современные технологии извлечения редкоземельных элементов из отходов.

СПРАВКА

РЗЭ — это группа из 17 химических элементов, включающая 15 лантаноидов, а также скандий и иттрий. Они получили название редкоземельных не из-за своей малой распространенности, а из-за трудностей извлечения их из руд.

РЗЭ широко применяются в электронике, возобновляемой энергетике, лазерных технологиях, оптике и оборонной промышленности благодаря своим уникальным магнитным, люминесцентным и каталитическим свойствам.

РЗЭ делятся на легкие и тяжелые в зависимости от их атомного номера и физических свойств. К легким РЗЭ относятся элементы от лантана до европия, к тяжелым — элементы от гадолиния до лютеция, а также иттрий.

МИРОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЗЭ

Мировое распределение РЗЭ крайне неравномерно: более 60 % мировой добычи приходится на Китай, который также контролирует до 85 % глобальных мощностей по переработке РЗЭ. Среди других крупных игроков — Австралия, США и Россия. Однако они в значительной степени зависят от китайских мощностей по очистке и обогащению.



В 2024 г. Китай усилил контроль над отраслью, ограничив экспорт отдельных соединений, включая соли гадолия и диспрозия, что вызвало волну беспокойства среди производителей оборонной продукции и «зеленой» энергетики в Евросоюзе и США. В ответ США объявили о создании стратегического запаса РЗЭ, а Евросоюз активизировал поддержку переработки отходов с высоким содержанием редкоземельных металлов.

РЗЭ традиционно получают из природного сырья, основные типы которого приведены в табл. 1.

Таблица 1. Природное сырье для получения РЗЭ

Природное сырье	Содержание РЗЭ (в пересчете на оксиды)	Преобладающие элементы	География	Особенности
Бастнезит	60–75 %	Легкие РЗЭ (церий, лантан, неодим)	США (Mountain Pass), Китай, Казахстан	—
Монцит	50–60 %	Легкие РЗЭ (церий, лантан, неодим, празеодим) и тяжелые РЗЭ (иттрий, торий)	Бразилия, Индия, Китай	Часто радиоактивен
Лопарит	30–35 %	Легкие РЗЭ (церий, лантан), ниобий	Россия (Кольский полуостров)	—
Ионно-абсорбционные глины	0,05–0,2 %	Тяжелые РЗЭ (диспрозий, тербий)	Южный Китай	Легко перерабатываются, низкая радиоактивность
Фергюсонит, эвксенит, иончандит	10–40 %	Тяжелые РЗЭ, ниобий, тантал, уран	Канада, Норвегия, США	Редкие, сложны в переработке, содержат радиоактивные элементы

ОТХОДЫ КАК ИСТОЧНИКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РЗЭ

Глобально переработка РЗЭ из вторсырья находится на начальной стадии развития: в мире мало специализированных предприятий и отработанных технологий получения РЗЭ из отходов. Однако данное направление быстро развивается. Несмотря на их критическую важность, в начале 2020-х годов из отходов получали около 1 % всех РЗЭ. Основная причина этого — крайне низкие концентрации РЗЭ в изделиях и их сложная связь с другими материалами, что затрудняет извлечение. Тем не менее с 2015 г. «городская добыча» (urban mining) и переработка отходов для получения РЗЭ стали приоритетными направлениями научных исследований и промышленных пилотных проектов во многих странах.

В мире для извлечения РЗЭ активно используются различные виды отходов — как промышленные, так и бытовые. Среди техногенных источников (промышленных отходов) важное значение для производства РЗЭ имеют красные шламы, образующиеся при производстве глинозема, содержащие скандий и иттрий. Фосфогипс,



побочный продукт производства фосфорной кислоты, также является источником церия, лантана и неодима. Золошлаковые отходы, образующиеся на тепловых электростанциях (ТЭС), могут содержать иттрий, церий и лантан. Кроме того, шлаки металлургических производств, особенно при переработке сурьмяных и титановых руд, могут быть богаты церием и европием.

К числу вторичных источников РЗЭ относятся отработанные изделия: магниты Nd-Fe-B, содержащие неодим, диспрозий и празеодим; никель-металлогидридные аккумуляторы (NiMH), содержащие лантан и неодим; отработанные катализаторы, содержащие церий и другие легкие РЗЭ; люминофоры и лампы, содержащие иттрий, европий и тербий. Значительное количество РЗЭ можно извлечь также из электронных отходов — жестких дисков, динамиков, наушников и моторов. Наконец, отходы от переработки урановых и ториевых руд являются источником тяжелых РЗЭ, включая иттрий, диспрозий и гадолиний.

Содержание РЗЭ в отходах приведено в табл. 2. В данной таблице отходы представлены не по общегосударственному классификатору Республики Беларусь ОКРБ 021-2019 «Классификатор отходов, образующихся в Республике Беларусь» (утвержден постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 09.09.2019 № 3-Т¹), а по их техногенному происхождению и содержанию РЗЭ, поскольку целью является демонстрация их потенциала в качестве альтернативного сырья для извлечения РЗЭ. Такой подход позволяет универсально охватить как промышленные, так и бытовые источники и более точно отразить их значимость в контексте переработки и ресурсосбережения.

Таблица 2. Содержание РЗЭ в отходах

Тип отходов	Содержание РЗЭ, %	Основные РЗЭ
Красные шламы (производство глинозема)	до 1,0	скандий, иттрий, лантан, церий, неодим
Фосфогипс	0,6–0,9	церий, лантан, неодим, европий, иттрий
Золошлаковые отходы (ТЭС)	до 1,0	иттрий, церий, лантан
Металлургические шлаки	2,0–5,0	церий, европий
Магниты Nd-Fe-B	29–33	неодим, празеодим, диспрозий
NiMH аккумуляторы	до 5	лантан, неодим, церий, празеодим
Отработанные катализаторы	до 1,8	церий, лантан, неодим
Люминофоры и лампы	до 10	иттрий, европий, тербий
Электронные отходы	до 1	неодим, празеодим, диспрозий
Отходы урановых и ториевых руд	до 0,5	иттрий, диспрозий, гадолиний

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЗЭ ИЗ ОТХОДОВ

Современные технологии извлечения РЗЭ из отходов включают как адаптированные классические, так и инновационные методы и подходы. Обычно это много-стадийный процесс, включающий разложение измельченного сырья, отделение

¹ В ред. от 20.02.2024; далее — ОКРБ 021-2019.



примесей, разделение РЗЭ на группы, получение индивидуальных соединений РЗЭ. Существуют и другие, менее распространенные варианты переработки. Основные технологии и их краткая характеристика представлены в табл. 3.

Таблица 3. Технологии получения РЗЭ из отходов

Технология	Эффективность извлечения	Экологические и экономические аспекты
Кислотное выщелачивание + выделение из раствора (гидрометаллургия)	до 90–95 % при оптимальных условиях	Требует сильных кислот и органических экстрагентов; в процессе образуются токсичные жидкие отходы, подлежащие обезвреживанию
Ионный обмен / сорбция	> 90 %, высокая селективность	Минимизируется объем образования жидких отходов; сами смолы могут требовать регенерации химреагентами
Биовыщелачивание	50–80 % (в лабораторных условиях)	Используются природные органические кислоты, снижается химическая нагрузка; процесс медленный, возможно образование биологических отходов
Пирометаллургия (переплавка, спекание)	около 90 % (при переплавке магнитов с восстановлением сплава)	Не требуются реагенты, но высокое энергопотребление; выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух при плавке
Технология, основанная на использовании ионных/эвтектических жидкостей	высокая (более 90 % в опытах)	Сниженная токсичность растворителя и возможность его повторного использования; требуются дорогие реагенты
Плазмохимическая технология	до 98 % при оптимальных условиях	Не требуются реагенты, но высокое энергопотребление; переработка сложных и загрязненных материалов

Наиболее распространены гидрометаллургические методы. Китай применяет для получения РЗЭ именно их. Как отмечено в табл. 3, эти методы основаны на выщелачивании руды с применением сильных кислот (в первую очередь серной и азотной) с последующим осаждением, экстракцией и прокаливанием целевых элементов.

Однако с 2024 г. все большую популярность приобретают плазмохимические методы. Они показывают высокую избирательность извлечения тяжелых РЗЭ и меньшую токсичность, но пока требуют значительных инвестиций и дорогостоящего оборудования.

ОПЫТ РАЗНЫХ СТРАН В ДОБЫЧЕ РЗЭ ИЗ ОТХОДОВ

Китай

Будучи мировым лидером по добыче РЗЭ, Китай также усиливает внимание к переработке вторичного сырья. За последнее десятилетие в стране введены строгие экологические нормы, стимулирующие переработку магнитных отходов и производства



с замкнутым циклом. Китайские корпорации собирают отработанные мощные магниты из техники и электроники, извлекая из них неодим и другие элементы для повторного использования.

Официальные данные о масштабах рециклинга скудны, но известно, что в Китае разрабатываются технологии извлечения РЗЭ из ионно-адсорбционных глин после выщелачивания (вторичная переработка отработанных растворов) и из побочных продуктов металлургии. Экономические стимулы (например, налоговые льготы) и большие объемы внутреннего электронного лома создают условия, при которых доля переработанных РЗЭ в Китае постепенно растет. Тем не менее основной упор по-прежнему делается на добычу из богатых месторождений, а не на отходы.

Япония

Япония — одна из первых стран, запустивших программу по получению РЗЭ из отходов. В 2010-х создано несколько предприятий по переработке электронных отходов (например, предприятие Dowa в пос. Косака). К 2020 г. в Японии действовали перерабатывающие линии, позволяющие ежегодно получать редкие металлы из примерно 300 тыс. т накопленных телефонов, компьютеров и прочей техники. Япония также развивает технологии разборки магнитов, снижая потребность в импорте неодима и диспрозия.

Южная Корея

Южная Корея в 2024 г. запустила пилотный центр по переработке высокотехнологичных отходов в г. Инчхоне. Проект поддержан государством и включает переработку старых дисплеев и гибридных аккумуляторов с извлечением иттрий-содержащих соединений и легких лантаноидов.

Саудовская Аравия

Саудовская Аравия на волне программы Vision 2030 инвестирует в развитие переработки редкоземельных компонентов из отходов солнечных панелей. Это часть национальной стратегии устойчивого развития и декарбонизации промышленности.

Страны Евросоюза

В Евросоюзе реализован ряд проектов, нацеленных на круговой цикл для РЗЭ. Например, бельгийская компания Solvay еще в 2012–2015 гг. запустила во Франции два завода для переработки люминофоров отработанных люминесцентных ламп, магнитов и аккумуляторов суммарной мощностью около 200 т оксидов РЗЭ в год. В рамках запущенных производств компании и научные центры отработали цепочки от сбора магнитного лома до получения новых магнитов и сплавов РЗЭ,



а также извлечение РЗЭ из отходов производства удобрений (апатитовых отходов). Например, пилотная установка в Норвегии (проект SecREEs) продемонстрировала извлечение неодима и иттрия из фосфогипса — побочного продукта производства фосфатных удобрений. Европейские наработки показывают возможность заместить до 10–15 % потребности в РЗЭ за счет рециклинга при поддержке экономических стимулов и экотехнологий.

США

США в последние годы сосредоточились на нетрадиционных источниках РЗЭ, прежде всего на отходах угледобычи и сжигания угля. Исследования выявили, что золы и шламы угольных ТЭС могут содержать до десятков миллионов тонн редкоземельных элементов суммарно.

С середины 2010-х годов в США финансируются пилотные комплексы по извлечению РЗЭ из угольных отходов и дренажных вод шахт. В 2018–2021 гг. возведены опытные установки в штатах Западная Вирджиния и Кентукки, где отработались методы выщелачивания кислотами с последующей сорбцией/экстракцией. В настоящее время США стремятся наладить промышленное получение редкоземельных концентратов из отходов угольного производства мощностью до 1000–3000 т РЗЭ в год.

К СЛОВУ

В Индии исследуют извлечение лантаноидов из хвостов обогащения монацитовых песков, а в Австралии рассматривают переработку остатков обогащения редкоземельных руд. Канада и ряд других стран инвестируют в стартапы, занимающиеся «городской добычей» — переработкой электронных отходов с выделением редких металлов.

Россия

Российский опыт получения РЗЭ из отходов вышел на уровень государственной стратегии. В 2010 г. госкорпорации «Росатом» и «Ростех» создали совместную рабочую группу по развитию редкоземельной отрасли. В 2013 г. Минпромторг принял комплексную программу развития добычи и производства РЗЭ, а с 2016 г. для стимулирования инвестиций был обнулен налог на добычу редкоземельных полезных ископаемых. В июне 2024 г. Правительство Российской Федерации утвердило обновленную Стратегию развития минерально-сырьевой базы до 2050 г., где редкоземельные элементы отнесены к группе наиболее дефицитных и значимых полезных ископаемых, критически важных для импортозамещения.

В 2016 г. на новгородском заводе компании «Акрон» (один из лидеров химической промышленности) начал функционировать цех по переработке апатитового концентрата — побочного продукта производства удобрений — с получением до 200 т разделенных оксидов РЗЭ в год. Апатитовый концентрат (и образующийся из него фосфогипс) содержит примеси иттрия, церия, неодима и др. Поэтому



технология «Акрон» фактически извлекает ценные компоненты из отходов производства фосфорных удобрений. Этот проект стал первым промышленным примером вовлечения техногенных отходов в редкоземельный сектор в России.

В 2018 г. в г. Королёве (Московская обл.) запущено экспериментальное производство по разделению коллективного концентрата РЗЭ на индивидуальные оксиды — лантана, церия и неодима — мощностью около 130 т в год². Этот пилотный завод отработал технологию разделения смесей редкоземельных компонентов, остающихся после извлечения ниобия и тантала. На его основе планируется модернизировать крупнейшее действующее предприятие — Соликамский магниевый завод (Пермский край), который исторически выпускал карбонаты РЗЭ из лопаритового сырья. В 2024 г. на площадке АО «Русредмет» (входящего в контур «Росатома») была запущена опытная линия разделения, где испытана новая технология глубокой переработки смеси редкоземельных концентратов (лантан, церий, празеодим, неодим)³.

Беларусь

В нашей стране в качестве перспективного сырья для получения РЗЭ рассматривали фосфогипс (код 3144501) и отработанный катализатор крекинга (код 5959900).

Фосфогипс, побочный продукт производства фосфорной кислоты в ОАО «Гомельский химический завод», содержит до 0,5 % массовых РЗЭ, включая лантан, церий и неодим. Исследования показали, что обработка фосфогипса азотной кислотой позволяет извлечь до 70–90 % РЗЭ. Оптимальные условия включают использование 20%-ного раствора азотной кислоты при температуре 60–95 °С и соотношении жидкость:твёрдое 4:1. Однако эффективность процесса может снижаться из-за образования труднорастворимых фторидов лантаноидов при накоплении фтора в растворе⁴.

Цеолитсодержащие катализаторы, используемые в нефтепереработке, модифицируются ионами РЗЭ, такими как лантан, церий и неодим, для повышения активности. После использования они содержат около 1,8 % РЗЭ. Исследования, проведенные в УО «БГТУ» с использованием отходов ОАО «Мозырский НПЗ», показали, что кислотное выщелачивание с использованием азотной кислоты позволяет извлечь до 85–99,9 % РЗЭ. Комплексная переработка отработанных катализаторов включает стадии кислотного выщелачивания РЗЭ, разделение суспензии с получением кислотного экстракта и твёрдого остатка, выделение концентрата лантана из кислотного раствора. Для получения товарных продуктов предусматриваются стадии промывки и сушки концентрата лантана и твёрдого остатка. Полученные остатки могут быть использованы в качестве сорбентов для очистки сточных вод от тяжёлых металлов⁵. Однако эти технологии переработки не нашли промышленного применения.

² Источник: <https://www.interfax-russia.ru> (короткая ссылка <https://clck.ru/3N3aYD>).

³ Дорохова И. Весь цвет РЗМ // «Вестник атомпрома». 2024. № 4 (май). С. 32–35.

⁴ Зык Н.В. Переработка фосфогипса с получением концентрата редкоземельных элементов на примере ОАО «Гомельский химический завод» / Н.В. Зык, В.О. Шункевич, В.В. Зык // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 2022. С. 214–219.

⁵ Козловская И.Ю. Комплексная переработка отработанного катализатора крекинга / И.Ю. Козловская, В.Н. Марцұл // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2013. Вып. 25. С. 90–94.



Следует отметить, что хотя уровень вовлеченности Беларуси в переработку РЗЭ пока сравнительно невысокий, но понимание потенциальной ценности техногенных ресурсов растет. По оценкам экспертов, грамотное внедрение технологий извлечения РЗЭ из отходов могло бы снизить зависимость Беларуси от импорта редких металлов и уменьшить экологические риски, связанные с накоплением отходов. Страна находится в начале пути: ведет исследования и мониторинг мирового опыта, закладывает научный фундамент. В ближайшие годы многое будет зависеть от экономической целесообразности: если цены на редкоземельную продукцию вырастут или появятся более дешевые технологии переработки, белорусская промышленность может подключиться к этому направлению совместно с российскими или китайскими партнерами.



Резюме

За последнее десятилетие технологии и практика получения редкоземельных элементов из отходов значительно продвинулись. Мировой опыт демонстрирует, что при поддержке государства и развитии инноваций возможно частично заместить добычу РЗЭ за счет рециклинга.

Российская Федерация за эти годы сформировала основу собственной редкоземельной индустрии, сочетая освоение уникальных месторождений с первыми шагами в переработке техногенного сырья. Впереди — масштабирование полученных результатов и интеграция в мировые цепочки производства редких металлов. Республика Беларусь, не имея своих руд, закладывает научные основы для вовлечения вторичного сырья, и ее дальнейший прогресс в этом направлении во многом будет определяться сотрудничеством с ведущими странами и конъюнктурой рынка. 

Станьте нашим автором!

Производственно-практический журнал
для экологов «Экология на предприятии»
приглашает к сотрудничеству:

- специалистов министерств и ведомств в области охраны окружающей среды;
- специалистов органов государственного управления, санитарного надзора и контроля;
- проектировщиков и разработчиков природоохранной документации;
- преподавателей, научных сотрудников и ученых, экологов-практиков, аудиторов, консультантов.

ЭКОЛОГИЯ

на предприятии

Подробную информацию о журнале вы можете получить на нашем сайте www.ecologia.by, а также по телефону (017) 388-35-82 и электронной почте editor@ecologia.by



-  Редакция примет к рассмотрению и опубликует наиболее интересные с практической точки зрения материалы.
-  Все поступающие материалы редактируются и согласовываются с автором.
-  Материалы принимаются в электронном виде с приложением информации об авторе.
-  Издательство предлагает достойные гонорары и обеспечивает качественную полиграфию.