

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

2026, Том 13, № 2 / 2026, Vol. 13, Iss. 2 <https://resources.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/01NZOR226.pdf>

DOI: 10.15862/01NZOR226 (<https://doi.org/10.15862/01NZOR226>)

1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические, географические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Жованик, И. А. Извлечение редкоземельных элементов из свалочного тела на примере полигонов твердых коммунальных отходов и смешанных полигонов Ханты-Мансийского автономного округа — Югры / И. А. Жованик, Ю. В. Жованик, О. А. Притужалова // Отходы и ресурсы. — 2026. — Т. 13. — № 2. — URL: <https://resources.today/PDF/01NZOR226.pdf>. DOI: 10.15862/01NZOR226.

For citation:

Zhovanik I.A., Zhovanik Yu.V., Prituzhalova O.A. Extraction of rare earth elements from landfill bodies: a case study of municipal solid waste and mixed landfills in the Khanty-Mansi Autonomous Okrug — Yugra. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2026;13(2): 01NZOR226. Available at: <https://resources.today/PDF/01NZOR226.pdf>. DOI: 10.15862/01NZOR226. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 504.05:661.865

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

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

**Извлечение редкоземельных элементов из
свалочного тела на примере полигонов твердых
коммунальных отходов и смешанных полигонов
Ханты-Мансийского автономного округа — Югры**

Аннотация. Редкоземельные металлы относятся к числу критически важных видов сырья из-за своей ограниченности и значимости для внедрения экологически чистых технологий. В условиях растущего интереса к вторичным источникам редкоземельных элементов оценка их содержания в свалочных грунтах полигонов твердых коммунальных отходов и золе от их сжигания представляется актуальной научно-практической задачей.

В статье освещаются результаты лабораторных экспериментов по извлечению редкоземельных элементов из свалочного тела полигонов твердых коммунальных отходов посредством метода озоления отходов с последующим выщелачиванием с применением цитрата и оксалата натрия. Исследование выполнено на примере полигонов, расположенных в Ханты-Мансийском автономном округе — Югре. Всего отбор проб проведен на 13 полигонах, в том числе на 8 полигонах коммунальных (бытовых) отходов и на 5 полигонах, где коммунальные отходы хранятся совместно с промышленными отходами.

Установлено, что твердые коммунальные отходы могут быть значимым источником редкоземельных элементов. Концентрации редкоземельных элементов как в золе от сжигания твердых коммунальных отходов, так и в осадочном продукте, полученном с использованием цитратно-оксалатного метода, меняются в широком диапазоне: от 5,88 г/т до 256,40 г/т по сумме редкоземельных элементов. Доминирующими элементами являлись лантан, церий, празеодим и неодим. Выявленные концентрации редкоземельных элементов коррелируют с составом размещенных на полигонах отходов. Они оказались наиболее высокими на полигонах городов Сургут, Югорск и Мегион и Радужный (три из четырех названных полигонов вмещают бытовые и промышленные отходы). Оцененная ресурсная база редкоземельных элементов на исследованных полигонах Ханты-Мансийского автономного округа — Югры (общий запас на полигонах) составляет ~22 т (с погрешностью $\pm 20\%$).

Ключевые слова: редкоземельные элементы; урбан-майнинг; фильтрат полигона ТКО; зола от сжигания твердых коммунальных отходов; цитратно-оксалатное выщелачивание; вторичные ресурсы

Введение

В последние десятилетия существенно расширились сферы применения редкоземельных элементов (РЗЭ), запасы которых сосредоточены в ограниченном числе стран, что обуславливает их дефицит на рынке [1]. В этой ситуации возникла потребность в извлечении РЗЭ из альтернативных источников сырья. Получить РЗЭ можно из двух категорий источников: первичное сырье, включающее наземные минеральные месторождения, морские осадки и морскую воду; вторичное сырье, представленное отходами переработки апатитового концентрата, золошлаковыми отходами угольных ТЭС, хвостохранилищами, образовавшимися в процессе добычи золота, меди, урана, полигонами коммунальных отходов, электронными и прочими отходами [2; 3].

При сравнении методов извлечения РЗЭ из первичного и вторичного сырья обычно акцентируется внимание на аспектах технологической и экономической эффективности; тем не менее, экологические последствия такой деятельности имеют не меньшую значимость [4; 5]. Немаловажным фактором также является потенциал экономии первичного сырья при извлечении РЗЭ из вторичных ресурсов.

Полигоны твердых коммунальных отходов (ТКО) и зола мусоросжгательных заводов как потенциальные источники РЗЭ имеют сравнительно слабую изученность [6–8]. Настоящая работа посвящена изучению свалочного тела на предмет содержания редкоземельных элементов (РЗЭ) и оценке потенциала их извлечения посредством цитратно-оксалатного осаждения.

Цель настоящего исследования состоит в проверке целесообразности альтернативной добычи РЗЭ из свалочного тела полигонов ТКО на примере полигонов, расположенных в Ханты-Мансийском автономном округе — Югре (ХМАО-Югре).

Объекты и методы исследования

Пробоотбор

Отбор проб из тела полигона (твёрдофазная фракция ТКО) осуществлялся в соответствии с российским стандартом СП 2.1.5.1059-01 «Гигиенические требования по защите грунтовых вод от загрязнения» и международным стандартом ISO 18400-101:2017 «Soil quality — Sampling Part 101: Framework for the preparation and application of a sampling plan». Пробы отбирались с полигонов ТКО, находящихся в ХМАО-Югре (ниже приводятся официальные названия полигонов, в них фигурирует термин «твёрдые бытовые отходы», так как эти полигоны созданы до введения в оборот термина ТКО):

1. Полигон твёрдых бытовых отходов, г. Белоярский.
2. Полигон твёрдых бытовых отходов в г. Лангепас.
3. Полигон для размещения твёрдых бытовых отходов, г. Мегион.
4. Полигон утилизации твёрдых бытовых отходов, г. Покачи.
5. Полигон твёрдых бытовых отходов, г. Радужный.
6. Полигон ТК и-ПО «27-й км», г. Сургут».
7. Полигон для захоронения твёрдых бытовых и производственных отходов, пгт. Междуреченский.
8. Комплексный межмуниципальный полигон для размещения, обезвреживания и обработки твёрдых коммунальных отходов для городов Нефтеюганска и Пыть-Яха, поселений Нефтеюганского района Ханты-Мансийского автономного округа — Югры.
9. Полигон по переработке твёрдых бытовых отходов в пгт. Октябрьское.
10. Полигон твёрдых бытовых отходов (ТБО), г. Советский.
11. Полигон для утилизации бытовых и промышленных отходов, г. Югорск.
12. Полигон бытовых и промышленных отходов в г. Ханты-Мансийск.

Выбор полигонов как объектов исследования обусловлен постоянством размещения и накопления отходов (поскольку пункты временного накопления отходов в ХМАО-Югре подразумевают накопление отходов до девяти календарных месяцев с последующей транспортировкой на полигоны либо утилизацией), а также наличием рядом крупнейших в округе населённых пунктов, но менее одного полигона на городской округ или иное муниципальное образование окружного значения. Выборка и определение статуса полигонов на территории округа были осуществлены путем анализа территориальной схемы обращения с отходами на территории ХМАО-Югры.¹

С целью повышения репрезентативности исследования производился отбор точечных проб в нескольких точках, на основе которых формировались объединённые пробы, представляющие типичный состав материала для изучаемой области. Были предприняты меры для предотвращения вторичного загрязнения в процессе отбора проб: применялись неметаллические инструменты; между отборами проб инструменты подвергались очистке и промывке; контейнеры для образцов герметично закрывались непосредственно после сбора.

¹ Территориальная схема обращения с отходами производства и потребления в Ханты-Мансийском автономном округе — Югре, утв. распоряжением Правительства Ханты-Мансийского автономного округа — Югры от 30.10.2025 г. № 486-рп. URL: https://depprom.admhmao.ru/activity/otraslevye-napravleniya/informatsiya-po-obrashcheniyu-s-otkhodami-proizvodstva-i-potrebleniya/105049-obshchestvennoe-obsuzhdenie-proekta-vneseniya-izmeneniy-te/proekt-rasporyazheniya-pravitelstva-khanty-mansiyskogo-avton_11667620/ (дата обращения: 01.03.2026).

Все пробы фиксировались в журнале, включающем данные о дате, месте отбора и условиях на момент процедуры. Для избежания изменений в составе проб во время транспортировки они помещались в контейнеры, исключающие контакт с внешней средой, и доставлялись в лабораторию в кратчайшие сроки.

Имитация лабораторной установки

В связи с разнородностью состава и структуры образцов ТКО для их обработки применяли метод озоления в специально собранной лабораторной установке, имитирующей систему сжигания отходов (рис. 1). Центральным элементом экспериментальной установки служит горизонтальный трубчатый реактор, изготовленный из кварцевой трубки, который рассчитан на работу в экстремальных условиях: способен выдерживать температуры до 1200°C и воздействие коррозионно-активных газов, в т. ч. HCl, SO₂, NO.

Конструктивно реактор разделён на три функциональные секции: секция холодной загрузки; секция пиролиза, обеспечивающая температурный режим в диапазоне 400–600°C; секция дожигания, работающая при температуре 800–1100°C. Каждая термическая секция оснащена автономно регулируемой печью, в которой образец выдерживается в течение 60 минут. Нагрев осуществлялся с помощью нихромовых нагревательных элементов. Система обеспечивала прецизионный контроль температуры с погрешностью ±10°C, что позволяет точно воспроизводить тепловые параметры промышленных печей.

Порцию отходов (50 г) загружали в кварцевый контейнер и последовательно перемещали через зоны реактора. Окислительные процессы контролировали путём подачи принудительного воздушного потока (10 л/мин, 1 атм), обеспечивающего ступенчатое сгорание летучих веществ. Температурный режим непрерывно отслеживали в каждой зоне с помощью термопар из сплавов хромель (NiCr) и алюмель (NiAl), которые обеспечивают высокую точность, стабильность и устойчивость к окислению в нейтральных и окислительных средах.

Ключевым элементом экологической безопасности эксперимента являлась интегрированная система очистки отходящих газов, организованная по принципу многоступенчатой фильтрации.

На первом этапе газовый поток охлаждали до 100–200°C в медном змеевике с водяным охлаждением, что вызывало конденсацию опасных соединений, таких как тяжёлые металлы, прекурсоры диоксинов.

На втором этапе при помощи керамических фильтров с размером пор 10 мкм удаляли твёрдые частицы (зола, сажа). Финальная стадия включала адсорбционную очистку в колонне с активированным углём и известняком, где нейтрализовали кислотные газы (HCl, SO₂) — основные источники коррозионной и токсической нагрузки.

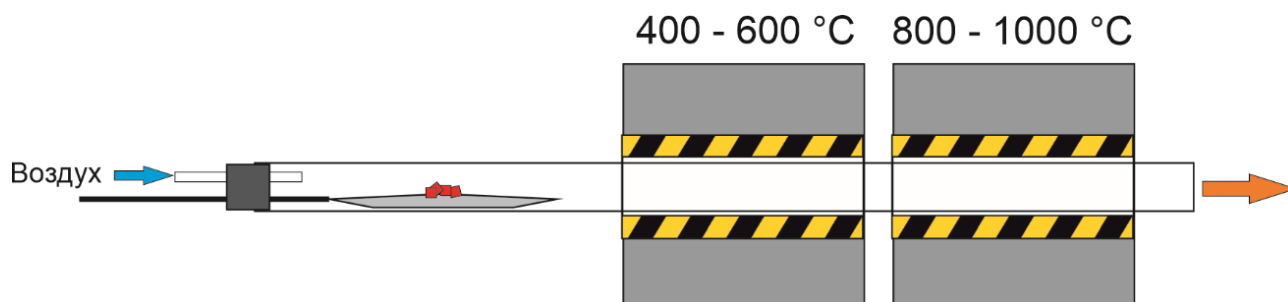


Рисунок 1. Лабораторная система, имитирующая работу установки по сжиганию промышленных отходов (разработана авторами)

Экстракция РЗЭ из золы от сжигания ТКО

Для извлечения РЗЭ из озоленных образцов, был использован метод последовательного выщелачивания с применением цитрата и оксалата натрия [9]. Отделение металлов от основной массы золы проводилось с помощью дигидроцитрата натрия ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), способного формировать устойчивые комплексы типа «металл-цитрат» в кислой среде.

С этой целью готовили суспензию с соотношением твёрдого к жидкому 1:20 (по массе), используя золу и раствор цитрата натрия с концентрацией 50 ммоль/л. Значение pH реакционной среды корректировали до 2,0 путём добавления 3-молярного раствора соляной кислоты (HCl). Полученную суспензию подвергали обработке на орбитальном шейкере в течение 4 ч. при скорости перемешивания 240 об./мин., что обеспечивало интенсивный массоперенос и эффективное взаимодействие реагентов. По завершении процесса выщелачивания суспензию фильтровали под вакуумом через мембранный фильтр с размером пор 0,22 мкм для полного отделения жидкой фазы от твёрдого остатка.

Твёрдый остаток, идентифицируемый как цитратный остаток, высушивали в сушильном шкафу при температуре 50°C и сохраняли для последующих аналитических или технологических операций.

Для селективного извлечения и концентрирования РЗЭ из цитратного фильтрата применяли метод совместного осаждения оксалатов. К цитратному фильтрату прибавляли 1 л раствора оксалата натрия ($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$) концентрацией 20 ммоль/л, что приводило к немедленному формированию белого осадка. Реакционную смесь выдерживали при комнатной температуре в течение 30 мин. с непрерывным перемешиванием на магнитной мешалке со скоростью, обеспечивающей гомогенизацию системы без механического разрушения формирующихся кристаллов. Данный этап необходим для достижения состояния фазового равновесия в системе «раствор — твёрдый осадок» и максимизации степени осаждения целевых компонентов. По завершении осадительного процесса суспензию фильтровали под вакуумом через мембранный фильтр с размером пор 0,22 мкм для полного отделения твёрдой фазы. Полученный твердый осадок (обозначаемый как оксалатный осадок) высушивали при температуре 50°C в сушильном шкафу и затем анализировали методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) с целью определения содержания РЗЭ.

Метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) реализован с использованием атомно-абсорбционного спектрофотометра «КонтрАА 700» (Analytic Jena, Германия). Пробы фильтрата готовили для анализа в соответствии с установленными протоколами. Экстракты из золы готовили по российскому стандарту ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98. Навеску анализируемого материала массой 1,0 г помещали в термостойкую колбу и обрабатывали 5 см³ азотной кислоты (HNO_3 , 5,0 моль/дм³). Колбу герметизировали и выдерживали на магнитной мешалке в течение 3 ч. при комнатной температуре и непрерывном перемешивании. Реакционную смесь фильтровали через мембранный фильтр с размером пор размером пор 0,22 мкм в мерную колбу вместимостью 50 см³, промывая фильтр бидистиллированной водой. Фильтрат доводили до метки бидистиллированной водой и тщательно перемешивали для гомогенизации раствора перед инструментальным анализом.

Результаты

Анализ содержания РЗЭ в золе полигонов твердых коммунальных и промышленных отходов различных районов ХМАО-Югры выявил значительные вариации концентраций РЗЭ как в исходной золе, так и в осадочном продукте, полученном с использованием цитратно-оксалатного метода. Для облегчения сравнительного анализа данные были сгруппированы на основе величины содержания РЗЭ следующим образом: полигоны с максимальными

значениями (табл. 1), с промежуточными значениями (табл. 2) и с минимальными значениями (табл. 3). Такая группировка отражает наблюдаемые закономерности накопления РЗЭ, которые, по-видимому, коррелируют с локальными экологическими, социально-экономическими и промышленными факторами.

В таблице 1 показаны данные по полигонам, характеризующимся наивысшими уровнями накопления РЗЭ. В данную группу вошли полигоны, расположенные в г. Сургут, г. Югорск, г. Мегион и г. Радужный. Для образцов золы, образующейся при сжигании ТКО с данных полигонов, зафиксированы концентрации РЗЭ в диапазоне от $9,94 \pm 0,38$ до $12,56 \pm 0,52$ г/т. В продукте, полученном после проведения цитратно-оксалатного осаждения, содержание указанных элементов достигло значений от $215,60 \pm 6,35$ до $256,40 \pm 7,66$ г/т, что наглядно демонстрирует высокую эффективность применяемого метода извлечения редкоземельных металлов из зольных остатков.

Таблица 1

**Содержание РЗЭ в золе ТКО и продукте
осаждения на примере наиболее крупных городов ХМАО-Югры**

№	Элемент	Полигон г. Сургут		Полигон г. Югорск		Полигон г. Мегион		Полигон г. Радужный	
		Содержание РЗЭ, г/т		Содержание РЗЭ, г/т		Содержание РЗЭ, г/т		Содержание РЗЭ, г/т	
		Зола	Продукт	Зола	Продукт	Зола	Продукт	Зола	Продукт
1	La	2,42 ±0,09	160,50 ±4,80	2,15 ±0,09	148,70 ±4,40	2,10 ±0,08	145,60 ±4,30	2,05 ±0,08	142,30 ±4,20
2	Nd	2,15 ±0,08	8,90 ±0,31	1,80 ±0,04	7,00 ±0,20	1,85 ±0,06	7,20 ±0,20	1,82 ±0,04	7,10 ±0,20
3	Sm	0,12 ±0,01	0,70 ±0,01	0,09 ±0,01	0,50 ±0,01	0,10 ±0,01	0,60 ±0,01	0,09 ±0,01	0,60 ±0,01
4	Ce	2,85 ±0,12	35,20 ±1,00	2,25 ±0,09	29,20 ±0,90	2,30 ±0,09	30,10 ±0,90	2,25 ±0,09	29,20 ±0,90
5	Pr	1,05 ±0,04	32,50 ±0,97	0,75 ±0,02	21,80 ±0,70	0,78 ±0,03	22,70 ±0,70	0,76 ±0,02	22,10 ±0,70
6	Y	0,30 ±0,01	0,80 ±0,01	0,23 ±0,01	0,60 ±0,01	0,23 ±0,01	0,60 ±0,01	0,22 ±0,01	0,60 ±0,01
7	Gd	0,35 ±0,01	1,00 ±0,02	0,28 ±0,01	0,80 ±0,01	0,29 ±0,01	0,80 ±0,01	0,28 ±0,01	0,80 ±0,02
8	Eu	0,15 ±0,01	2,00 ±0,08	0,11 ±0,01	1,50 ±0,05	0,11 ±0,01	1,50 ±0,06	0,11 ±0,01	1,50 ±0,04
9	Tb	1,20 ±0,06	8,50 ±0,30	0,95 ±0,03	6,80 ±0,22	0,95 ±0,05	6,80 ±0,22	0,92 ±0,03	6,60 ±0,14
10	Dy	0,20 ±0,01	0,20 ±0,01	0,15 ±0,01	0,20 ±0,01	0,15 ±0,01	0,20 ±0,01	0,14 ±0,01	0,20 ±0,01
11	Ho	0,18 ±0,01	0,60 ±0,01	0,13 ±0,01	0,50 ±0,01	0,13 ±0,01	0,50 ±0,01	0,13 ±0,01	0,50 ±0,01
12	Er	0,45 ±0,02	0,50 ±0,01	0,33 ±0,01	0,40 ±0,01	0,33 ±0,01	0,40 ±0,01	0,31 ±0,01	0,40 ±0,01
13	Tm	0,35 ±0,02	2,60 ±0,08	0,26 ±0,01	1,90 ±0,07	0,26 ±0,01	1,90 ±0,07	0,25 ±0,01	1,80 ±0,07
14	Yb	0,04 ±0,01	0,20 ±0,01	0,03 ±0,01	0,20 ±0,01	0,03 ±0,01	0,20 ±0,01	0,03 ±0,01	0,20 ±0,01
15	Lu	0,25 ±0,01	1,00 ±0,02	0,18 ±0,01	0,70 ±0,01	0,18 ±0,01	0,70 ±0,01	0,17 ±0,01	0,70 ±0,02
16	Sc	0,50 ±0,02	1,20 ±0,02	0,42 ±0,02	1,00 ±0,02	0,42 ±0,02	1,00 ±0,02	0,41 ±0,02	1,00 ±0,03
	Сумма	12,56 ±0,52	256,40 ±7,66	10,11 ±0,39	221,80 ±6,64	10,21 ±0,43	220,80 ±6,55	9,94 ±0,38	215,60 ±6,38

Составлено авторами

Таблица 2 представляет данные по полигонам, характеризующимся средними уровнями накопления РЗЭ. В выборку вошли образцы, отобранные на объектах в г. Лангепас, г. Покачи, г. Ханты-Мансийск и пгт. Белоярский. Для золы, полученной в результате озоления ТКО с данных полигонов, зафиксированы концентрации РЗЭ в интервале от $8,77 \pm 0,39$ до $9,78 \pm 0,40$ г/т. В продукте, выделенном методом цитратно-оксалатного осаждения, содержание РЗЭ достигло значений от $188,52 \pm 5,66$ до $212,00 \pm 6,25$ г/т, подтверждая эффективность применяемой технологии осаждения.

В таблице 3 приведены данные по полигонам, характеризующимся наименьшими уровнями накопления РЗЭ. В выборку вошли полигоны, расположенные в г. Нефтеюганске и г. Пыть-Ях, пгт. Междуреченский, пгт. Октябрьское и г. Советском. Для образцов золы, образующейся при сжигании ТКО на указанных полигонах, зафиксированы концентрации РЗЭ в диапазоне от $5,88 \pm 0,29$ до $8,20 \pm 0,35$ г/т. В продукте, полученном после проведения цитратно-оксалатного осаждения, содержание РЗЭ составило от $128,83 \pm 3,92$ до $178,31 \pm 5,19$ г/т, что подтверждает сохранение эффективности процесса концентрирования даже для объектов с исходно низкими уровнями содержания РЗЭ.

Таблица 2

**Содержание РЗЭ в золе ТКО и продукте осаждения
в относительно крупных населённых пунктах ХМАО-Югры**

№	Элемент	Полигон г. Лангепас		Полигон г. Покачи		Полигон г. Ханты-Мансийск		Полигон пгт. Белоярский	
		Содержание РЗЭ, г/т		Содержание РЗЭ, г/т		Содержание РЗЭ, г/т		Содержание РЗЭ, г/т	
		Зола	Продукт	Зола	Продукт	Зола	Продукт	Зола	Продукт
1	La	2,01 ±0,08	140,20 ±4,10	1,95 ±0,07	135,80 ±4,00	1,90 ±0,06	130,10 ±3,80	1,85 ±0,08	125,40 ±3,70
2	Nd	1,80 ±0,05	7,00 ±0,20	1,75 ±0,06	6,80 ±0,20	1,60 ±0,05	6,10 ±0,18	1,65 ±0,07	6,20 ±0,16
3	Sm	0,09 ±0,01	0,60 ±0,01	0,09 ±0,01	0,50 ±0,01	0,08 ±0,01	0,50 ±0,01	0,08 ±0,01	0,50 ±0,02
4	Ce	2,20 ±0,08	28,50 ±0,90	2,10 ±0,08	27,40 ±0,80	2,00 ±0,08	26,00 ±0,80	1,95 ±0,09	25,30 ±0,80
5	Pr	0,75 ±0,02	21,80 ±0,70	0,72 ±0,02	21,00 ±0,60	0,68 ±0,02	19,80 ±0,60	0,65 ±0,02	18,90 ±0,60
6	Y	0,22 ±0,01	0,60 ±0,01	0,21 ±0,01	0,60 ±0,01	0,20 ±0,01	0,50 ±0,01	0,20 ±0,01	0,50 ±0,01
7	Gd	0,28 ±0,02	0,80 ±0,01	0,27 ±0,01	0,80 ±0,01	0,25 ±0,01	0,70 ±0,01	0,25 ±0,01	0,70 ±0,02
8	Eu	0,10 ±0,01	1,40 ±0,04	0,10 ±0,01	1,40 ±0,04	0,09 ±0,01	1,20 ±0,03	0,09 ±0,01	1,20 ±0,04
9	Tb	0,90 ±0,03	6,40 ±0,14	0,85 ±0,02	6,10 ±0,11	0,85 ±0,02	6,10 ±0,12	0,80 ±0,02	5,70 ±0,16
10	Dy	0,14 ±0,01	0,20 ±0,01	0,13 ±0,01	0,20 ±0,01	0,13 ±0,01	0,20 ±0,01	0,12 ±0,01	0,20 ±0,01
11	Ho	0,12 ±0,01	0,40 ±0,01	0,12 ±0,01	0,40 ±0,01	0,11 ±0,01	0,40 ±0,01	0,11 ±0,01	0,40 ±0,01
12	Er	0,32 ±0,02	0,40 ±0,01	0,30 ±0,01	0,40 ±0,01	0,29 ±0,01	0,40 ±0,01	0,28 ±0,01	0,40 ±0,01
13	Tm	0,25 ±0,01	1,80 ±0,07	0,24 ±0,01	1,80 ±0,06	0,23 ±0,01	1,70 ±0,06	0,22 ±0,01	1,60 ±0,05
14	Yb	0,03 ±0,01	0,20 ±0,01	0,03 ±0,01	0,20 ±0,01	0,03 ±0,01	0,10 ±0,01	0,02 ±0,01	0,12 ±0,02
15	Lu	0,17 ±0,01	0,70 ±0,01	0,16 ±0,01	0,60 ±0,01	0,16 ±0,01	0,60 ±0,01	0,15 ±0,01	0,60 ±0,02
16	Sc	0,40 ±0,02	1,00 ±0,02	0,38 ±0,02	0,90 ±0,02	0,37 ±0,02	0,90 ±0,02	0,35 ±0,01	0,80 ±0,03
	Сумма	9,78 ±0,40	212,00 ±6,25	9,40 ±0,37	204,90 ±5,91	8,97 ±0,35	195,30 ±5,69	8,77 ±0,39	188,52 ±5,66

Составлено авторами

Таблица 3

Содержание РЗЭ в золе ТКО и продукте осаждения в малых городах и поселках городского типа ХМАО-Югры (составлено авторами)

№	Элемент	Полигон г. Нефтеюганск, г. Пыть-Ях		Полигон пгт. Междуреченский		Полигон пгт. Октябрьское		Полигон г. Советский	
		Содержание РЗЭ, г/т		Содержание РЗЭ, г/т		Содержание РЗЭ, г/т		Содержание РЗЭ, г/т	
		Зола	Продукт	Зола	Продукт	Зола	Продукт	Зола	Продукт
1	La	1,75 ±0,07	118,90 ±3,50	1,65 ±0,06	110,20 ±3,20	1,40 ±0,05	92,50 ±2,70	1,40 ±0,05	88,00 ±2,50
2	Nd	1,55 ±0,06	5,90 ±0,15	1,45 ±0,05	5,50 ±0,15	1,20 ±0,03	4,50 ±0,10	1,18 ±0,03	3,60 ±0,10
3	Sm	0,07 ±0,01	0,40 ±0,01	0,07 ±0,01	0,40 ±0,01	0,06 ±0,01	0,30 ±0,01	0,04 ±0,01	0,20 ±0,01
4	Ce	1,85 ±0,07	24,10 ±0,70	1,75 ±0,07	22,80 ±0,70	1,50 ±0,06	19,50 ±0,60	1,40 ±0,05	20,00 ±0,70
5	Pr	0,60 ±0,02	17,50 ±0,50	0,55 ±0,02	16,00 ±0,50	0,45 ±0,02	13,10 ±0,40	0,32 ±0,02	10,50 ±0,35
6	Y	0,18 ±0,01	0,50 ±0,01	0,17 ±0,01	0,50 ±0,01	0,14 ±0,01	0,40 ±0,01	0,10 ±0,01	0,40 ±0,01
7	Gd	0,23 ±0,01	0,70 ±0,02	0,22 ±0,01	0,60 ±0,02	0,18 ±0,01	0,50 ±0,02	0,15 ±0,01	0,50 ±0,02
8	Eu	0,08 ±0,01	1,10 ±0,03	0,07 ±0,01	1,00 ±0,03	0,06 ±0,01	0,80 ±0,02	0,03 ±0,01	0,70 ±0,03
9	Tb	0,75 ±0,02	5,40 ±0,13	0,70 ±0,02	5,00 ±0,12	0,60 ±0,02	4,30 ±0,10	0,40 ±0,02	2,60 ±0,10
10	Dy	0,11 ±0,01	0,20 ±0,01	0,10 ±0,01	0,10 ±0,01	0,09 ±0,01	0,10 ±0,01	0,01 ±0,01	0,10 ±0,01
11	Ho	0,10 ±0,01	0,30 ±0,01	0,09 ±0,01	0,30 ±0,01	0,08 ±0,01	0,30 ±0,01	0,06 ±0,01	0,20 ±0,01
12	Er	0,25 ±0,01	0,30 ±0,01	0,24 ±0,01	0,30 ±0,01	0,20 ±0,01	0,30 ±0,01	0,25 ±0,01	0,40 ±0,01
13	Tm	0,20 ±0,01	1,50 ±0,05	0,19 ±0,01	1,40 ±0,04	0,16 ±0,01	1,20 ±0,04	0,17 ±0,01	0,80 ±0,03
14	Yb	0,02 ±0,01	0,11 ±0,01	0,02 ±0,01	0,10 ±0,01	0,02 ±0,01	0,10 ±0,01	0,02 ±0,01	0,13 ±0,01
15	Lu	0,14 ±0,01	0,60 ±0,02	0,13 ±0,01	0,50 ±0,01	0,11 ±0,01	0,40 ±0,01	0,10 ±0,01	0,30 ±0,01
16	Sc	0,32 ±0,01	0,80 ±0,03	0,30 ±0,01	0,70 ±0,02	0,25 ±0,01	0,60 ±0,03	0,25 ±0,02	0,40 ±0,02
	Сумма	8,20 ±0,35	178,31 ±5,19	7,70 ±0,33	165,40 ±4,85	6,50 ±0,29	138,90 ±4,08	5,88 ±0,29	128,83 ±3,92

Составлено авторами

Разделение на группы подчеркивает отчетливые пространственные и контекстуальные различия во встречаемости РЗЭ. Полигоны первой группы (табл. 1), преимущественно ассоциированные с промышленными зонами, проявляли повышенные уровни РЗЭ, потенциально связанные с поступлением отходов от нефтегазодобывающих операций, часто включающих материалы с содержанием РЗЭ, такие как катализаторы и электронные компоненты. Напротив, промежуточная группа (табл. 2) включает объекты со смешанным урбанистически-промышленным влиянием, приводящим к умеренному накоплению РЗЭ. Третья группа (табл. 3) охватывает

более удаленные или низкоактивные локации, где содержание РЗЭ, по-видимому, ограничено меньшим разнообразием отходов и более слабыми социально-экономическими факторами генерации высокотехнологичных отходов. Эти вариации подчеркивают влияние состава локальных отходов на потенциал извлечения РЗЭ, с близостью к промышленным объектам как ключевым детерминантам более высоких концентраций.

Дискуссия

Национальная безопасность РФ существенно зависит от обеспечения стратегическими минеральными ресурсами, включая РЗЭ, потребление которых превышает добычу и, по прогнозам, вырастет более чем в четыре раза к 2030 году, превысив 5,2 тыс. т. Несмотря на наличие 18 разведанных месторождений с запасами свыше 28 млн т, добыча РЗЭ требует значительных инвестиций и трудозатрат, поскольку они обычно выступают примесями в апатит-нефелиновых рудах.

В этой связи целесообразным является использование альтернативных источников, таких как золошлаковые материалы от сжигания угля и ТКО, накопленных в объеме свыше 2,5 млрд. т с ежегодным приростом. Эти материалы обладают содержанием РЗЭ, сравнимым с природными рудами, при существенно меньших затратах на переработку [10]. Их вовлечение в хозяйственный оборот будет способствовать снижению экологической нагрузки при получении РЗЭ.

На сегодняшний день в реалиях отечественных исследований потенциал извлечения металлов из ТКО является «белым пятном» в силу того, что в настоящее время доминируют два способа извлечения металлов: гидрометаллургия (извлечение водными растворами химических реагентов) и пирометаллургия (извлечение при помощи высоких температур). Оба упомянутых способа характеризуются высокой эффективностью и масштабируемостью, однако требуют значительных затрат электроэнергии, водоснабжения и применения агрессивных химикатов (H_2SO_4 , HNO_3), что в свою очередь оставляет существенный экологический след.

Метод цитратно-оксалатного осаждения, напротив, базируется на использовании безопасных и биоразлагаемых соединений: цитрата натрия ($Na_3C_6H_5O_7$) и оксалата натрия ($Na_2C_2O_4$). Соляная кислота в методике нужна исключительно для создания среды реакции и в процессе расходуется целиком, что подтверждается нейтральным рН цитратного фильтра после окончания эксперимента.

По сравнению с пирометаллургией, которая требует высокой энергии и ресурсной базы для плавки, и генерирует большие объемы парниковых газов, этот метод работает при комнатных температурах, что делает его более безопасным для окружающей среды и доступным для масштабирования.

В сравнении с гидрометаллургией цитратно-оксалатное осаждение задействует значительно более мягкие реактивы (биоразлагаемые лиганды против концентрированных кислот), но ограничено более низкой эффективностью при нейтральном рН.

На основе выявленных концентраций РЗЭ в золе, полученной при сжигании отходов (коэффициент золообразования из 1 кг свалочного тела — 0,4–0,45 кг/кг ТКО), проведена оценка общего запаса РЗЭ в свалочных телах 12 полигонов ХМАО-Югры. Средний выход золы принят как 0,425 кг/кг ТКО. Расчёты, представленные в табл. 4 опираются на общедоступные данные по накопленным объёмам ТКО¹ и лабораторные измерения содержания РЗЭ в золе (табл. 1–3).

Таблица 4

Расчетный запас РЗЭ на исследованных полигонах ()

Населенный пункт	Накопленный объем отходов, тыс. тонн	Объем золы, тыс. тонн	Среднее содержание РЗЭ в 1 тонне золы, г/т	Запас РЗЭ на полигоне, тонн
г. Сургут	1 576,29	669,92	12,56	8,4
г. Югорск	892,32	379,24	10,11	3,8
г. Мегион	935,13	397,43	10,21	4,1
г. Радужный	351,06	149,20	9,94	1,5
г. Лангепас	207,55	88,21	9,78	0,9
г. Покачи	145,94	62,02	9,4	0,6
г. Ханты-Мансийск	464,98	197,62	8,97	1,8
пгт. Белоярский	87,66	37,26	8,77	0,3
г. Нефтеюганск и г. Пыть-Ях	107,94	45,87	8,20	0,4
пгт. Междуреченский	79,41	33,75	7,70	0,3
г. Советский	52,69	22,39	6,50	0,1
пгт. Октябрьское	10,12	4,30	5,88	0,03

Составлено авторами на основе Территориальной схемы обращения с отходами производства и потребления в Ханты-Мансийском автономном округе — Югре¹ и собственных исследований

Общий накопленный объем ТКО на исследуемых полигонах оцениваются в 4911,09 млн т. Общий запас РЗЭ по полигонам: ~22 т (с погрешностью $\pm 20\%$ из-за вариаций коэффициента золообразования), что указывает на перспективность региона как источника вторичных РЗЭ для диверсификации поставок.

Также отметим, что простое оставление полигонов ТКО без экскавации, сортировки и переработки накопленных отходов для извлечения полезных компонентов, что является наиболее частой практикой в ХМАО-Югре и во многих других регионах России, связано с высоким уровнем негативного воздействия на окружающую среду. В первую очередь, оно обусловлено формированием свалочного фильтрата, содержащего тяжелые металлы, неорганические соединения и органические кислоты, загрязняющего окружающую среду даже после закрытия полигонов [11; 12].

При использовании предлагаемого метода проблема свалочного фильтрата будет постепенно решаться. Также он позволит предотвратить воздействие на окружающую среду, сопряженное с геологоразведкой, вскрышными и добычными работами по извлечению РЗЭ-содержащих руд, снизить финансовые затраты на логистику и выбросы загрязняющих веществ при перевозках сырья, ведь полигоны отходов расположены в непосредственной близости от крупных промышленных и транспортных узлов в отличие от удаленных рудников.

Таким образом, вовлечение накопленных объемов ТКО в оборот через цитратно-оксалатный метод значительно снижает совокупную экологическую нагрузку, превращая потенциально опасные отходы в полезные ресурсы, минимизируя негативное воздействие на окружающую среду (в частности, загрязнение почвы и грунтовых вод) и высвобождая земельные участки. Этот подход соответствует принципам циркулярной экономики, которая подразумевает активное зацикливание вторичных ресурсов, пока это позволяют технические возможности [13].

На сегодня в ХМАО-Югре практически не развита система раздельного накопления потенциально ценного вторсырья РЗЭ, например, отходов электроники, оргтехники, осветительных приборов. Эти обогащенные РЗЭ отходы попадают на полигоны ТКО [14]. При внедрении высокоэффективной системы предварительного (до захоронения) отбора отходов с высоким содержанием РЗЭ их концентрации в молодых свалочных телах, очевидно, упадут. Однако, учитывая значительный объем накопленных за последние десятилетия отходов, ресурсная база полигонов ТКО и смешанных полигонов как источников РЗЭ все же оценивается как внушительная.

Ограничения исследования

Настоящее исследование базируется на результатах лабораторных экспериментов. Необходимо опробование метода озоления ТКО с последующим выщелачиванием с применением цитрата и оксалата натрия в больших масштабах. Для этого, в свою очередь, необходимо провести детальное изучение одного или нескольких полигонов ТКО для выяснения точных качественно-количественных характеристик, в том числе состава свалочных грунтов, объемов запасов [11]. В ходе внедрения промышленных масштабов извлечения РЗЭ из ТКО целесообразно выполнить комплекс исследований, показывающих, насколько «зеленой» является предложенная технология, например, измерить показатели водного следа, углеродного следа или провести комплексную оценку жизненного цикла по ГОСТ Р ИСО 14044-2021.

В задачи настоящего исследования не входил вопрос экономической эффективности извлечения РЗЭ из отходов. Хотя традиционно считается, что первичное сырье обладает преимуществом с точки зрения затрат [12], динамика цен на РЗЭ требует пересмотра вопроса экономической привлекательности вторичных источников.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию затрат на химические реагенты, а также на одновременное извлечение других ценных металлов из ТКО. А более детальное изучение характеристик получаемых цеолитов позволит определить потенциальную область их применения.

Заключение

Значительная часть редкоземельных элементов, использованных в различных изделиях, в настоящее время концентрируется именно на объектах размещения отходов, в том числе на полигонах коммунальных отходов. Другими словами, полигоны ТКО представляют собой техногенные образования с высоким содержанием РЗЭ. Однако, если не развивать урбан-майнинг, свалочные грунты фактически утрачивают свое сырьевое значение.

Вместе с тем, как показало исследование, применение предложенного метода обработки золы сжигания ТКО обеспечивает не только высокую эффективность извлечения и очистки РЗЭ, но и значительное сокращение объемов накопленных отходов, а также весомые экологические преимущества, что делает его перспективным для масштабного применения.

Разработка эффективных технологий рекуперации РЗЭ из ТКО отвечает глобальному тренду на создание замкнутых циклов использования критического сырья, позволяет решать геоэкологические проблемы и достигать баланса экономических, экологических и социальных интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stegen K.S. Heavy rare earths, permanent magnets, and renewable energies: An imminent crisis / K.S. Stegen. — DOI: 10.1016/j.enpol.2014.12.015 // Energy Policy. — 2015. — 79. — P. 1–8. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421514006806?casa_token=yIXRQ5UJH8wAAAAA:wf8xQ8Gw5N-HtEtB-9Am9w4bKdNKIV1ELqald9UIEzbZEUVERSg4SJniGNEOdH_0k2J7FaY9aEM (дата обращения: 01.03.2026).

2. Dang D.H. Toward the circular economy of rare earth elements: a review of abundance, extraction, applications, and environmental impacts / D.H. Dang, K.A. Thompson, L. Ma, H.Q. Nguyen, S.T. Luu, M.Th.N. Duong, A. Kernaghan. — DOI: 10.1007/s00244-021-00867-7 // Archives of environmental contamination and toxicology. — 2021. — 81. — P. 521–530. — URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00244-021-00867-7#citeas> (дата обращения: 01.03.2026).
3. 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. — DOI: 10.15862/24NZOR425 // Отходы и ресурсы. — 2025. — Т. 12. — № 4. — URL: <https://resources.today/PDF/24NZOR425.pdf> (дата обращения: 01.03.2026).
4. 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: 01.03.2026).
5. Schreiber A. Environmental Impacts of Rare Earth Mining and Separation Based on Eudialyte: A New European Way / A. Schreiber, J. Marx, P. Zapp, J.-F. Hake, D. Voßenkaul, B. Friedrich. — DOI 10.3390/resources5040032 // Resources. — 2016. — Т. 5, № 4. — URL: <https://www.mdpi.com/2079-9276/5/4/32> (дата обращения: 01.03.2026).
6. Morf L.S. Precious metals and rare earth elements in municipal solid waste—sources and fate in a Swiss incineration plant / L.S. Morf, R. Gloor, O. Haag, M. Haupt, S. Skutan, F. Di Lorenzo, D. Böni. — DOI 10.1016/j.wasman.2012.09.010 // Waste Management. — 2013. — 33.3. — P. 634–644. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X12004229?casa_token=yjWWse2aJasAAAAA:bwWqbzCOIY4hJvSQ6KNYErj2f4fkqt-zY9ipdRXbUUdppQ0F0ek8FjZLFeugZ43jpQNHkNKgRsk (дата обращения: 01.03.2026).
7. Gutiérrez-Gutiérrez S.C. Rare earth elements and critical metal content of extracted landfilled material and potential recovery opportunities / S.C. Gutiérrez-Gutiérrez, F. Coulon, Y. Jiang, S. Wagland. — DOI: 10.1016/j.wasman.2015.04.024 // Waste Management. — 2015. — 42. — P. 128–136. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X15003190?casa_token=z7xj8sGmVxsAAAAA:J35deMn152yNUzHHWuylp_VexjqpImrLkK5WGpBsxRJZiEQLQBVQXc3IngqWboCLLFPxK33SMU0 (дата обращения: 01.03.2026).
8. Funari V. The rare earth elements in municipal solid waste incinerators ash and promising tools for their prospecting / V. Funari, S.N.H. Bokhari, L. Vigliotti, T. Meisel, R. Braga. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.09.015 // Journal of Hazardous materials. — 2016. — Т. 301. — P. 471–479. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389415300716?casa_token=-hLiP7MnLocAAAAA:TxjYM1bSeso6yXbOD3PIfgnw0wStoLtY56IwsdY_Aozg9isllNnptF72kCfhJJAmp_v1Pt0EoG8 (дата обращения: 01.03.2026).
9. Wen Y. Rare earth elements recovery and waste management of municipal solid waste incineration ash / Y. Wen, L. Hu, A. Boxleiter, D. Li, Y. Tang. — DOI: 10.1021/acssusresmg.3c00026 // ACS Sustainable Resource Management. — 2023. —

- Т. 1. — № 1. — С. 17–27. — URL:
<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acssusresmgmt.3c00026> (дата обращения: 01.03.2026).
10. 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: 01.03.2026).
 11. Притужалова О.А. Анализ изученности свалочного фильтрата на российских полигонах твердых коммунальных отходов / О.А. Притужалова, И.А. Жованик. — DOI: 10.35634/2412-9518-2023-33-4-413-426 // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. — 2023. — Т. 33, вып. 4. — С. 413–426. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-izuchennosti-svalochnogo-filtrata-na-rossijskih-poligonah-tverdyh-kommunalnyh-othodov> (дата обращения: 01.03.2026).
 12. Wang J. A comprehensive review of landfill leachate treatment technologies / J. Wang, Z. Qiao. — DOI: 10.3389/fenvs.2024.1439128 // Frontiers in Environmental Science. — 2024. — Т. 12. — С. 1439128. — URL: <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2024.1439128/full> (дата обращения: 01.03.2026).
 13. Ильина Е.А. Циркулярная экономика: концептуальные подходы и механизмы их реализации // Организатор производства. — 2022. — № 3. — С. 21–30. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsirkulyarnaya-ekonomika-kontseptualnye-podhody-i-mehanizmy-ih-realizatsii> (дата обращения: 01.03.2026).
 14. 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-economy2023-6/b33-bakanach-zykov.pdf> (дата обращения: 01.03.2026).
 15. 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: 01.03.2026).
 16. 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: 01.03.2026).

Zhovanik Ilya Aleksandrovich

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 Victorovna

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

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

Extraction of rare earth elements from landfill bodies: a case study of municipal solid waste and mixed landfills in the Khanty-Mansi Autonomous Okrug — Yugra

Abstract. Rare earth metals are classified as critically important raw materials due to their scarcity and significance in the implementation of environmentally sustainable technologies. Amid growing interest in secondary sources of rare earth elements (REE), the assessment of their content in landfill soils of municipal solid waste sites and the ash derived from their incineration emerges as a pertinent scientific and practical challenge.

This article presents the results of laboratory experiments on REE extraction from landfill bodies of municipal solid waste landfills using a method involving waste ashing followed by leaching with sodium citrate and oxalate. The study was conducted on landfills located in the Khanty-Mansi Autonomous Okrug — Yugra. Samples were collected from a total of 13 landfills, including 8 dedicated to municipal (household) waste and 5 where municipal waste is co-stored with industrial waste.

It has been established that municipal solid waste can serve as a significant source of REE. Concentrations of REE in both the ash from incinerated municipal solid waste and the precipitated product obtained via the citrate-oxalate method vary widely: from 5,88 g/t to 256,40 g/t for total REE. The dominant elements were lanthanum, cerium, praseodymium, and neodymium. The identified REE concentrations correlate with the composition of waste deposited at the landfills. They were highest at the landfills in the cities of Surgut, Yugorsk, Megion, and Raduzhny (three of the four mentioned landfills accommodate both household and industrial waste). The estimated resource base of REE at the studied landfills in the Khanty-Mansi Autonomous Okrug — Yugra (total reserves across the landfills) amounts to approximately 22 t (with an uncertainty of $\pm 20\%$).

Keywords: rare earth elements; urban mining; landfill leachate; municipal solid waste incineration ash; citrate oxalate leaching; secondary resources