

ГЕОЭКОЛОГИЯ

GEOECOLOGY

DOI: 10.22363/2313-2310-2025-33-4-467-476

EDN: ILJLFQ

УДК 504.054

Научная статья / Research article

Электронные отходы как источник загрязнения почв тяжелыми металлами: динамика выщелачивания в условиях имитации полигона отходов

Д.А. Останний¹✉, М.А. Шахраманьян^{1,2}

¹Российский государственный социальный университет, факультет комплексной безопасности и основ военной подготовки, Москва, Российская Федерация

²Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва, Российская Федерация
✉ daostanny@ya.ru

Аннотация. Электронные отходы представляют серьезную экологическую угрозу из-за содержания тяжелых металлов. Цель исследования — оценка выщелачивания тяжелых металлов (Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Ni) из печатных плат и кабелей в условиях имитации городской свалки (метод SPLP, 8 циклов). Установлено, что электронные отходы являются значимым источником загрязнения. Печатные платы демонстрировали постепенный рост концентраций Cu (до 2,33 мг/л), Pb (до 0,666 мг/л) и Zn (до 1,385 мг/л) в фильтрате. Для кабелей был характерен высокий начальный вынос Cu (3,50 мг/л) с последующим снижением. Разработана эвристическая модель оценки риска.

Ключевые слова: электронные отходы, тяжелые металлы, выщелачивание, загрязнение почв, экологический риск, печатные платы, кабели, фильтрат, городская свалка, моделирование

Вклад авторов. Останний Д.А. — концептуализация, методология, проведение исследования, администрирование данных, визуализация, создание черновика рукописи. Шахраманьян М.А. — концептуализация, руководство исследованием, формальный анализ, создание рукописи и ее редактирование, верификация данных. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

История статьи: поступила в редакцию 06.08.2025; доработана после рецензирования 22.08.2025; принята к публикации 02.09.2025.

© Останний Д.А., Шахраманьян М.А., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Останий Д.А., Шахраманьян М.А. Электронные отходы как источник загрязнения почв тяжелыми металлами: динамика выщелачивания в условиях имитации полигона отходов // Вестник Российской университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2025. Т. 33. № 4. С. 467–476. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-467-476>

Electronic waste as a source of heavy metal contamination of soils: leaching dynamics under simulated landfill conditions

Daniil A. Ostanniy¹✉, Mikhail A. Shakhramanyan^{1,2}

¹ Russian State Social University, Department of Complex Security and Fundamentals of Military Training, Moscow, Russian Federation

² Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation
✉daostanny@ya.ru

Abstract. Electronic waste poses a serious environmental threat due to the content of heavy metals. The aim of the work is to evaluate the leaching of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Ni) from printed circuit boards and cables under simulated urban landfill conditions (SPLP method, 8 cycles). E-waste was found to be a significant source of contamination. Printed circuit boards showed a gradual increase in the concentrations of Cu (up to 2.33 mg/L), Pb (up to 0.666 mg/L) and Zn (up to 1.385 mg/L) in the leachate. The cables were characterized by high initial Cu removal (3.50 mg/L) followed by a decrease. A heuristic risk assessment model was developed.

Keywords: electronic waste, heavy metals, leaching, soil contamination, environmental risk, printed circuit boards, cables, leachate, municipal landfill, modeling

Authors' contribution. D.A. Ostanniy — conceptualization, methodology, investigation, data curation, visualization, writing — original draft. M.A. Shahramanyan — conceptualization, supervision, formal analysis, writing — review and editing, validation. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Article history: received 06.08.2025; revised 22.08.2025; accepted 02.09.2025.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

For citation: Ostanniy DA, Shakhramanyan MA. Electronic waste as a source of heavy metal contamination of soils: leaching dynamics under simulated landfill conditions. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2025;33(4):467–476. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2025-33-4-467-476>

Введение

Электронные отходы являются одним из самых быстрорастущих потоков твердых отходов в мире. По оценкам ВОЗ, в 2022 г. в глобальном масштабе было образовано около 62 млн т электронных отходов, при этом лишь 22 % из

них подверглись официальному сбору и переработке. Остальная часть электронных отходов часто попадает на полигоны или перерабатывается неформальными методами, что приводит к высвобождению в окружающую среду множества токсичных веществ, в том числе тяжелых металлов (свинец, кадмий и др.)¹. Проблема утилизации электронного мусора актуальна и для России: ежегодно в стране образуется около 1,6 млн т отходов электрического и электронного оборудования, а перерабатывается лишь порядка 6 %². Электронные устройства содержат опасные компоненты — в их составе присутствуют свинец, кадмий, ртуть и другие токсичные элементы, представляющие угрозу для экологии, если такие отходы захоранивать на обычных свалках.

Основная экологическая опасность электронных отходов связана с возможностью выщелачивания тяжелых металлов и других токсикантов в почву и грунтовые воды при их захоронении. В странах с недостаточной системой утилизации электронных отходов (например, на свалках Африки и Азии) фиксируется значительное загрязнение почв тяжелыми металлами в местах скопления электронного мусора [1]. Металлы из компонентов электронной техники (Cu, Pb, Zn, Cd, Ni и др.) могут мигрировать в почвенно-грунтовую среду, аккумулироваться в верхних слоях почвы и создавать риски для экосистем и здоровья населения [2].

Цель исследования — оценка выщелачивания тяжелых металлов из различных типов электронных отходов в условиях, имитирующих городской полигон, и расчет показателя экологического риска такого загрязнения. Задачи исследования включали лабораторное моделирование процессов выщелачивания тяжелых металлов под воздействием кислых осадков, измерение концентраций основных металлов (Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Ni) в фильтратах, анализ результата и разработка эвристической модели позволяют использовать ее как базовый инструмент для первичной оценки потенциального загрязнения [3; 4].

Гипотеза исследования. Предполагается, что выщелачивание тяжелых металлов из электронных отходов на свалке подчиняется закономерностям, зависящим от pH, электропроводности, типа отходов и времени контакта с осадками. Их выявление позволит более точно оценивать концентрации загрязнителей и классифицировать отходы по уровню опасности, что станет основой для разработки экологических норм и стратегий снижения негативного воздействия.

¹ Electronic waste (e-waste) // World Health Organization. Geneva: World Health Organization; 2024. URL: [\(accessed: 13.05.2025\).](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/electronic-waste-(e-waste))

² Число пунктов по приему отходов электротехники в России превысило 1400 : Новости РЭО // Российский экологический оператор (РЭО). 2023. 3 октября. URL: [\(дата обращения: 14.05.2025\).](https://reo.ru/tpost/oac9fp5b61-chislo-punktov-po-priemu-otходов-elektro)

Материалы и методы

Эксперимент проводился в условиях, имитирующих слой почвы городского полигона с инфильтрацией осадков. В качестве субстрата использовали чернозем (рН 6,8), загруженный по 500 г в сосуды объемом 1 л. На поверхность добавляли по 50 г отходов: (1) фрагменты печатных плат, (2) отрезки медных кабелей с частично снятой изоляцией, (3) контроль — только почва. Каждый вариант выполнялся в трех повторностях.

Имитирование кислотных осадков. Для ускоренного выщелачивания токсичных элементов применяли раствор, имитирующий кислый дождь. Были использованы стандартизованные условия Synthetic Precipitation Leaching Procedure (SPLP) — смесь серной и азотной кислоты в соотношении 60:40 с итоговым рН \approx 5,5 [5]. Через 24 ч после закладки образцов осуществляли увлажнение поверхности каждого сосуда кислотным раствором в объеме 100 мл (что соответствует интенсивному дождю). Раствор равномерно вносили на поверхность почвы, после чего через дренаж собирали фильтрат через 24 ч. Процедуру повторяли ежедневно, всего 8 циклов, что имитировало многократное выпадение осадков.

Измеряемые показатели. После каждого цикла собирали фильтрат и проводили измерения следующих показателей: рН, электрическая проводимость (ЕС, характеризует суммарную минерализацию раствора) и концентрации тяжелых металлов (в работе контролировались Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Ni — основные металлы, присутствующие в электронной технике) [3]. Значения рН измеряли с помощью лабораторного рН-метра (предварительно откалиброванного буферными растворами при рН 4,0 и 7,0). Электропроводность определяли кондуктометрически при 25 °C с использованием переносного кондуктометра. Отбор проб фильтрата для анализа металлов проводили в пластиковые пробирки, предварительно промытые кислотой. Пробы подкисляли HNO₃ до рН < 2 и хранили при +4 °C до анализа. Концентрации металлов (Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Ni) измеряли методом атомно-абсорбционной спектрометрии (AAS) на спектрометре с графитовой печью. Калибровка приборов проводилась с использованием государственных стандартных образцов растворов металлов. Границы обнаружения методов составляли: 0,001 мг/л для Cd; 0,005 мг/л для Pb; 0,01 мг/л для Cu, Zn, Ni; 0,02 мг/л для Cr.

Результаты

Изменения рН. В ходе имитации многократных осадков происходили заметные изменения рН фильтратов и их минерализации по сравнению с исходным раствором (табл. 1). Начальное значение рН кислого дождя составляло 5,5; при прохождении через почвенную колонку в контроле (только почва) фильтрат уже на первом цикле нейтрализовался до рН \approx 7,0 за счет щелочности почвы.

го запаса чернозема. В вариантах с электронными отходами нейтрализация была менее выраженной: так, pH фильтрата после 1-го дня в образцах с печатными платами составил около 6,2, а с кабелями — около 6,5.

Таблица 1. Динамика pH фильтрата в зависимости от типа электронных отходов и времени контакта с кислотными осадками

Тип образца	24 ч	48 ч	72 ч	96 ч	120 ч	144 ч	168 ч	192 ч
Печатные платы	~6,2	~6,0	~5,8	~5,8	~5,9–6,0	~6,0–6,2	~6,1–6,3	~6,2–6,4
Кабели	~6,5	~6,4–6,5	~6,2–6,3	~6,2–6,3	~6,3–6,4	~6,4–6,5	~6,5	~6,5
Контроль (только почва)	~7,0	~7,0	~6,9–7,0	~6,9–7,0	~6,9–7,1	~7,0–7,1	~7,0–7,1	~7,0–7,1

Источник: составлено Д.А. Останним, М.А. Шахраманьянном.

Начиная со 2–3-го дня в образцах с электронными отходами отмечалась тенденция к усилению кислотности: минимальные значения pH (~5,8) регистрировались на 3–4-е сутки в опытах с печатными платами. В дальнейшем наблюдалось постепенное восстановление pH до 6,0–6,3 к 8-му дню, что может быть связано с исчерпанием подкисляющих веществ и стабилизацией почвенного буфера. В контроле же pH фильтрата оставался стабильным в пределах 6,8–7,1 на всем протяжении эксперимента.

Электропроводность фильтратов с электронными отходами на всем протяжении эксперимента существенно превышала контроль (табл. 2). Уже после первого цикла она достигала 2,1 мСм/см для плат и ~1,5 мСм/см для кабелей, тогда как в контроле не превышала 0,4 мСм/см. Это указывает на интенсивный вынос солей и металлов в начальный период. Со 2-х суток наблюдалось снижение до ~1,3–1,6 мСм/см к 3–4 циклу, а с 5-го по 8-й день показатели стабилизировались на уровне 1,2–1,4 мСм/см, что отражает более инерционную фазу. В контроле значения оставались ≤ 0,5 мСм/см, то есть в 3–4 раза ниже, чем с отходами.

Таблица 2. Динамика электропроводности ЕС, мСм/см, фильтрата в зависимости от типа электронных отходов и времени контакта

Тип образца	24 ч	48 ч	72 ч	96 ч	120 ч	144 ч	168 ч	192 ч
Печатные платы	2,1	~1,6	~1,5	~1,4	1,3–1,4	1,2–1,3	1,2–1,3	1,2–1,3
Кабели	~1,5	~1,4	~1,3	~1,3	1,2–1,3	~1,2	~1,2	~1,2
Контроль (только почва)	≤0,4	≤0,4	≤0,4	≤0,4	≤0,5	≤0,5	≤0,5	≤0,5

Источник: составлено Д.А. Останним, М.А. Шахраманьянном.

Концентрации тяжелых металлов в фильтратах. Во всех фильтратах, полученных из колонок с электронными отходами, были зафиксированы существенно повышенные концентрации контролируемых тяжелых металлов

по сравнению с контрольной почвой. Данные по динамике выщелачивания приведены в трех таблицах. В контрольных фильтратах содержание всех металлов оставалось стабильно низким: меди и свинца — не выше 0,02 мг/л, кадмия и хрома — на уровне следов, что отражает фоновые уровни вымывания из незагрязненного чернозема (табл. 3).

Таблица 3. Концентрации тяжелых металлов в фильтратах, мг/л, в зависимости от типа образца (диапазоны по 8 циклам эксперимента)

Металл	Печатные платы	Кабели	Контроль (почва)
Cd	0,012–0,023 (рост)	<0,005 (не обнаруж.)	<0,002 (не обнаруж.)
Cr	0,032–0,055 (рост спад)	<0,01 (не обнаруж.)	0,003–0,005 (фон)
Cu	1,21–2,33 (устойчивый рост)	3,50 0,97 (резкий спад)	0,012–0,020 (фон)
Ni	0,182–0,371 (рост)	0,082 0,026 (спад)	0,006–0,010 (фон)
Pb	0,359–0,666 (рост)	0,032 <0,01 (спад до не обнаруж.)	0,003–0,005 (фон)
Zn	0,832–1,385 (рост)	0,15 0,05 (спад)	0,022–0,030 (фон)

Источник: составлено Д.А. Останий, М.А. Шахраманьяном.

Наиболее активными в выщелачивании элементами оказались медь, свинец и цинк. В опытах с печатными платами концентрация меди постепенно возрастила от 1,20 до 2,33 мг/л, а свинца — от 0,35 до 0,67 мг/л, достигая максимальных значений на 8-м цикле. Также фиксировалось постепенное увеличение концентрации цинка до 1,39 мг/л. Кадмий, никель и хром в этом варианте опыта имели стабильные, но меньшие значения: до 0,03 мг/л для кадмия, 0,37 мг/л для никеля и 0,055 мг/л для хрома. В варианте с кабелями преобладала медь, причем уже в первые сутки ее концентрация достигала 3,5 мг/л, затем снижалась до менее 1,0 мг/л.

В образцах с печатными платами наблюдался устойчивый рост суммарной концентрации металлов в фильтрате от ~3 мг/л в первые сутки до более 5 мг/л к 192-му часу (8-е сутки), без признаков выхода на плато. Такая динамика указывает на постепенное разрушение изоляционных и лаковых слоев, открывающее новые участки токопроводящих дорожек, а также постепенное вовлечение менее доступных металлических фракций в процессы выщелачивания. В варианте с кабелями, напротив, максимальный вынос металлов (~3,5 мг/л) был зафиксирован уже на 1-е сутки, после чего суммарная концентрация в фильтрате постепенно снижалась, достигнув менее 1 мг/л к окончанию наблюдения. Это указывает на быстрое вымывание доступной меди с поверхности жил и последующее замедление коррозионных процессов вследствие пассивации и отсутствия других значимых источников металлов. В контрольной колонке концентрации тяжелых металлов на протяжении всего эксперимента оставались в пределах 0,1 мг/л, что соответствует

фоновому уровню растворимых компонентов чернозема при кислотном увлажнении.

Полученные результаты демонстрируют, что электронные отходы при контакте с кислым фильтратом способны высвобождать в окружающую среду существенные количества тяжелых металлов.

В опытах с кабелями пик меди фиксировался уже в первом цикле, затем ее концентрация снижалась. Это связано с вымыванием поверхностной фракции и последующей пассивацией жилы оксидными пленками, а также с поглощением ионов Cu^{2+} почвой. При pH выше 5 часть меди дополнительно осаждается в виде гидроксидов, что ограничивает ее подвижность.

При выщелачивании меди из печатных плат ее концентрация постепенно возрастала. Сначала кислота проникала лишь частично, затем разрушение защитных покрытий обнажало новые участки металла, увеличивая площадь контакта и интенсивность растворения. В отличие от кабелей, где процесс кратковременный, платы обеспечивают медленный, но устойчивый вынос меди даже на поздних стадиях.

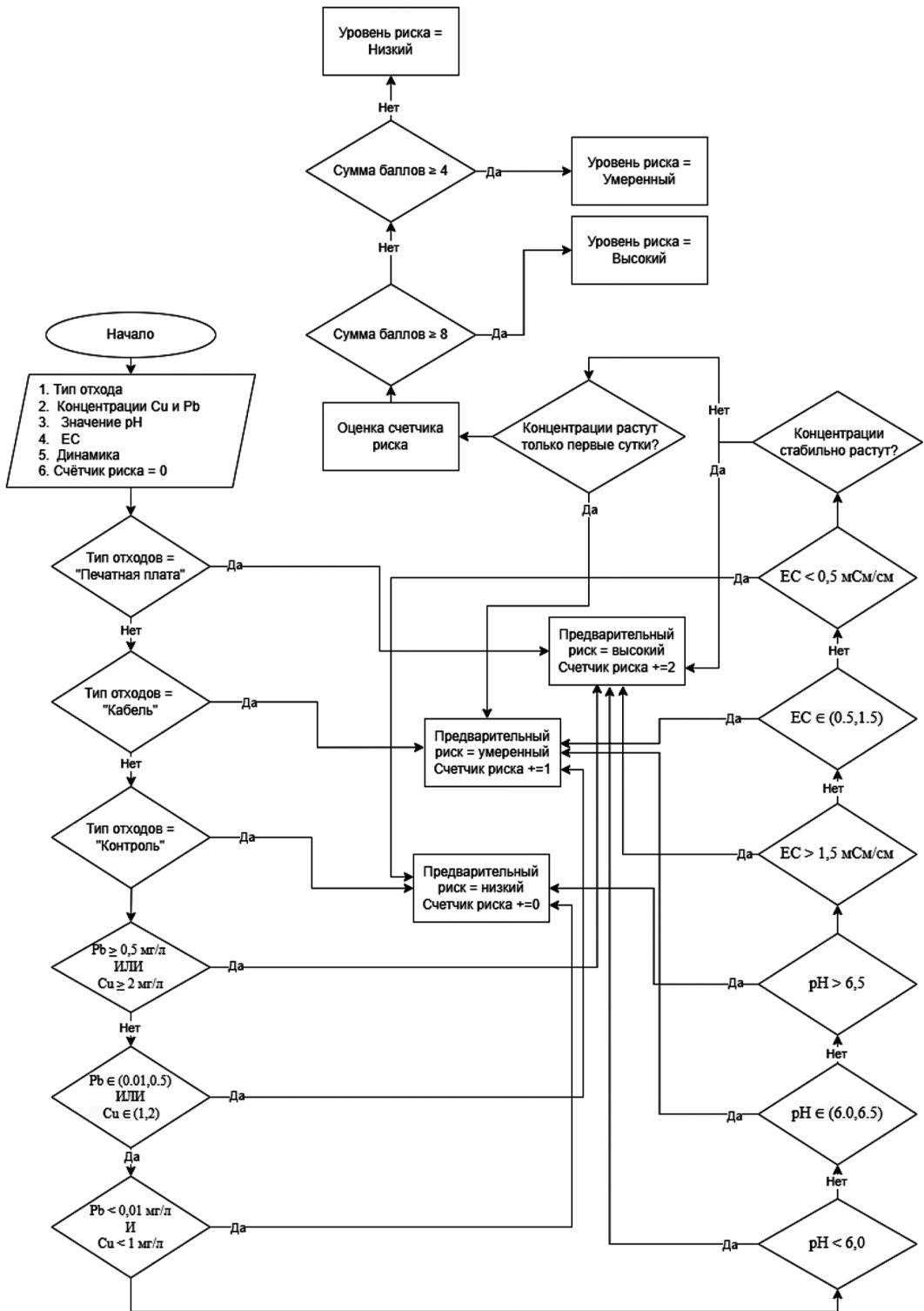
Важно отметить, что органические материалы печатных плат и кабельной изоляции (эпоксидные смолы, текстолит, ПВХ) в исследовании не анализировались. Однако, по данным S. Brandsma et al. [6], они могут выделять токсичные соединения (бисфенол-А, формальдегид, бромированные антиприоры, свинцовые и кадмевые стабилизаторы, фталаты, диоксины и др.), обладающие высокой стойкостью и способностью к биоаккумуляции³.

Таким образом, настоящее исследование, сфокусированное на неорганических загрязнителях, следует рассматривать как важный первый этап в оценке комплексного воздействия электронных отходов.

Эвристическая модель

Для описания закономерностей выщелачивания тяжелых металлов разработана эвристическая модель, фиксирующая зависимость концентраций загрязнителей от типа отходов и параметров среды. Она использует балльную систему: высокий риск — 2 балла, умеренный — 1, низкий — 0. Суммарный результат по пяти критериям дает итоговую категорию риска: 8–10 баллов — высокий, 4–7 — умеренный, менее 4 — низкий. Логическая схема модели приведена на рис.

³ Electronic waste (e-waste) // World Health Organization. Geneva: World Health Organization; 2024. URL: [\(accessed: 13.05.2025\).](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/electronic-waste-(e-waste))



Блок-схема эвристической модели оценки экологического риска на основе параметров фильтрата и типа электронных отходов

Источник: составлено Д.А. Останий.

Заключение

В ходе исследования проведена лабораторная имитация выщелачивания тяжелых металлов из электронных отходов при условиях, аналогичных воздействию кислых дождевых осадков на городском полигоне. На основании полученных результатов можно сформулировать следующие выводы:

- Электронные отходы являются значимым источником загрязнения тяжелыми металлами. В моделируемых условиях (кислотные осадки) и платы, и кабели высвобождали в фильтрат меди, свинец, цинк, кадмий, никель и хром. Уже после первого цикла концентрации меди и свинца превышали фон в десятки раз, что указывает на интенсивный вынос металлов в начальный период.
- Динамика выщелачивания зависит от природы отходов. Для фрагментов печатных плат характерно постепенное нарастание концентраций металлов в фильтрате и относительно длительное сохранение их высокого уровня, тогда как из медных кабелей основная масса легкорастворимой меди вымывается уже при первом поступлении влаги.
- Разработана эвристическая модель оценки риска, классифицирующая уровень загрязнения по типу отходов, концентрации Cu и Pb, pH и электропроводности. Модель в виде блок-схемы с балльной системой интегрирует эти факторы в итоговую категорию риска и может применяться для первичной оценки загрязнения при планировании мониторинга и утилизации.

Рекомендации. Результаты подтверждают необходимость раздельного сбора и переработки электронных отходов, особенно содержащих свинец и кадмий. Их захоронение с бытовым мусором недопустимо, так как они становятся источником длительного загрязнения. Для снижения риска следует развивать системы утилизации и извлечения опасных компонентов, а также учитывать полученные данные при разработке нормативов и мер по охране окружающей среды.

Список литературы

- [1] Adu J.T., Aneke F.I. Evaluation of heavy metal contamination in landfills from e-waste disposal and its potential as a pollution source for surface water bodies // Results in Engineering. 2025. Vol. 25. P. 104431. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104431>
- [2] Sud S.B., Wibowo A.V.A., Khullar R., Rahardja E., Patni S., Lee J., Wanandy N.S., Mondejar J.L., Sondhi S. Evaluating Water Spinach for Heavy Metal Phytoremediation in Indonesian Agricultural Soils // 2024 IEEE International Conference on Technology, Informatics, Management, Engineering and Environment (TIME-E). 2024. P. 122–128. doi: 10.1109/TIME-E62724.2024.10919867. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10919867/> (accessed: 31.05.2025)
- [3] Hossain M., Patra P.K. Water pollution index — A new integrated approach to rank water quality // Ecological Indicators. 2020. Vol. 117. P. 106668. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106668> EDN: JQUSBV

- [4] *Abou Zakhem B., Hafez R.* Heavy metal pollution index for groundwater quality assessment in Damascus Oasis, Syria // *Environmental Earth Sciences*. 2015. Vol. 73. P. 6591–6600. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3882-5> EDN: WBUCLO
- [5] *Donkor A., Owusu G., Banson S., Ziwu C., Bonzongo J.C., Nyarko S.O., Tawiah R., Asante I.K., Nyame F.K.* Leaching of trace metals from mixed electronic waste using four extraction methods // *Science and Development*. 2017. Vol. 1. No. 1. P. 1–19. URL: <https://ugspace.ug.edu.gh/items/f5ddac92-74c2-495f-8ad6-228ea3180389> (accessed: 31.05.2025)
- [6] *Brandsma S., Leonards P., Koekkoek J., Samsonek J., Puype F.* Migration of hazardous contaminants from WEEE-contaminated polymeric toy material by mouthing // *Chemosphere*. 2022. Vol. 294. P. 133774. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133774. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522002673> (accessed: 13.10.2025)

Сведения об авторах:

Останий Даниил Александрович, аспирант, факультет комплексной безопасности и основ военной подготовки, Российский государственный социальный университет, Российская Федерация, 129226, г. Москва, ул. В. Пика, д. 4. ORCID: 0009-0009-1107-4922; eLIBRARY SPIN-код: 2500-8186. E-mail: daostanny@ya.ru

Шахраманьян Михаил Андраникович, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, Финансовый университет при Правительстве РФ, академик РАЕН, Российская Федерация, 125993, Москва, Ленинградский пр-т, д. 49. ORCID: 0000-0003-4943-8946; eLIBRARY SPIN-код: 6603-6401. E-mail: shahramanianma@corp-univer.ru