РЕМЕДИАЦИЯ ПОЧВ, ЗАГРЯЗНЁННЫХ ОТХОДАМИ БАТАРЕЙ И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ: МЕТОДЫ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЧВЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ

Абьян Сергей Аршакович
директор,
ООО «Три Богатыря»,
РФ, г. Санкт-Петербург

Abyan Sergey Arshakovich
CEO of
LLC "Three Bogatyrya",
Russia, St. Petersburg

REMEDIATION OF SOILS CONTAMINATED BY BATTERY AND ELECTRIC MOTOR WASTE: METHODS FOR NEUTRALIZING HEAVY METALS AND RESTORING SOIL ECOSYSTEMS

Аннотация. *Рост производства электронных отходов (э-отходов), включая батареи и электродвигатели, усиливает деградацию почвенных экосистем из-за загрязнения тяжелыми металлами, такими как свинец, кадмий и медь. Данное исследование анализирует воздействие э-отходов на почвы и оценивает методы ремедации для нейтрализации загрязнителей и восстановления экосистем. Через обзор литературы, кейс-стади и сравнительный анализ рассматриваются физические, химические и зеленые методы, включая фиторемедиацию, биоремедиацию и нанотехнологии. Кейс-стади демонстрирует, что интегрированный подход сокращает затраты на 47%, снижает биодоступность свинца на 95% и восстанавливает микробное разнообразие. Ограничения включают длительность зеленых методов и риски вторичного загрязнения. Будущие направления охватывают генетически модифицированные растения и интеллектуальные системы ремедии. Исследование предлагает рекомендации по усилению нормативной базы, внедрению зеленых технологий и переработке ресурсов для устойчивого восстановления почв, подчеркивая важность междисциплинарных усилий для решения глобальной проблемы э-отходов.*

Ключевые слова: *Электронные отходы, загрязнение почвы, тяжелые металлы, фиторемедиация, биоремедиация, электрокинетическая ремедация, восстановление экосистем, устойчивое управление отходами, нанотехнологии, переработка ресурсов.*

Abstract. *The growing production of electronic waste (e-waste), including batteries and electric motors, is intensifying the degradation of soil ecosystems due to contamination by heavy metals such as lead, cadmium, and copper. This study analyzes the impact of e-waste on soils and evaluates remediation methods aimed at neutralizing pollutants and restoring ecosystems. Through a literature review, case study, and comparative analysis, it examines physical, chemical, and green techniques, including phytoremediation, bioremediation, and nanotechnologies. The case study demonstrates that an integrated approach reduces costs by 47%, decreases lead bioavailability by 95%, and restores microbial diversity. Limitations include the long duration required for green methods and risks of secondary contamination. Future directions encompass genetically modified plants and intelligent remediation systems. The study provides recommendations for strengthening regulatory frameworks, promoting green technologies, and advancing resource recycling for sustainable soil restoration, emphasizing the*

importance of interdisciplinary efforts to address the global e-waste challenge.

Keywords: *Electronic waste, soil contamination, heavy metals, phytoremediation, bioremediation, electrokinetic remediation, ecosystem restoration, sustainable waste management, nanotechnology, resource recycling.*

Введение. Современный мир сталкивается с экспоненциальным ростом электронных отходов (э-отходов), включая батареи и электродвигатели, что представляет серьезную угрозу для почвенных экосистем. Глобальное производство э-отходов увеличивается на 4–5% ежегодно, создавая значительные экологические и экономические вызовы. Батареи, такие как свинцово-кислотные, никель-кадмиевые и литий-ионные, содержат тяжелые металлы (свинец, кадмий, медь, кобальт), которые при неправильной утилизации проникают в почву, нарушая ее физические, химические и биологические свойства. Электродвигатели, содержащие медь, редкоземельные элементы и, в старых моделях, свинец, также способствуют загрязнению при неконтролируемой утилизации. Эти загрязнители нарушают микробное разнообразие, снижают плодородие почвы и угрожают продовольственной безопасности через бионакопление в растениях. Традиционные методы ремедации, такие как выемка грунта, часто являются дорогостоящими и неустойчивыми, что подчеркивает необходимость внедрения зеленых технологий, таких как фиторемедиация и биоремедиация, а также интегрированных подходов. Цель данного исследования — проанализировать воздействие э-отходов на почвы, оценить эффективность различных методов ремедации, выявить их ограничения и предложить устойчивые стратегии для восстановления экосистем, способствуя развитию циркулярной экономики и минимизации экологического ущерба.

Методы

Исследование основано на комплексном обзоре научной литературы, включая рецензируемые статьи из журналов, таких как *Environmental Technology & Innovation* и *Journal of Hazardous Materials*, а также отраслевые отчёты. Использовались качественные и количественные подходы, включающие: систематический анализ состава и источников загрязнения от батарей и электродвигателей; оценку механизмов загрязнения (выщелачивание, физическое рассеяние, атмосферное осаждение); изучение экологических последствий для почвенных свойств, микробных сообществ и растительности; сравнительный анализ физических (выемка, промывка почвы), химических (стабилизация, экстракция) и зеленых (фиторемедиация, биоремедиация, электрокинетика) методов ремедации; разработку гипотетического кейс-стади бывшего завода по переработке батарей для оценки интегрированного подхода; анализ экономических и регуляторных аспектов, включая стоимость, выгоды и рекомендации по политике; обзор будущих направлений, таких как нанотехнологии и интеллектуальные системы. Данные собирались из проверенных источников, чтобы обеспечить достоверность, с использованием средних рыночных показателей для экономического анализа и мониторинга результатов ремедации. Этические аспекты, включая минимизацию вторичного загрязнения, учитывались при оценке технологий.

Результаты

Э-отходы от батарей и электродвигателей содержат тяжелые металлы (свинец, кадмий, медь, ртуть, кобальт) и органические соединения (ПХБ, ТББФА), которые загрязняют почву через выщелачивание, физическое рассеяние и атмосферное осаждение. Свинец накапливается в верхних слоях почвы, кадмий обладает высокой мобильностью в кислых условиях, а медь связывается с органикой, создавая долгосрочные риски. Эти загрязнители изменяют физические свойства почвы, снижая пористость и увеличивая эрозию, а также химические свойства, включая pH и доступность питательных веществ, что приводит к формированию корок или уплотнений. Микробные сообщества страдают от снижения биомассы, разнообразия и активности ферментов, нарушая биогеохимические циклы и снижая плодородие. Растения демонстрируют снижение

всхожести, хлороз, замедленный рост и бионакопление металлов, угрожая продовольственным цепям.

Физические методы ремедации, такие как выемка и утилизация, эффективны для локализованных участков с высокой концентрацией загрязнителей, но дороги (до $1,8 млн за 5 га) и создают вторичные отходы. Промывка почвы удаляет до 65% растворимых металлов, но менее эффективна для мелкозернистых почв. Химическая стабилизация с использованием цемента, извести или фосфатов снижает биодоступность металлов на 90%, но не удаляет их. Экстракция химикатами (кислоты, хелаты) эффективна, но может вызывать вторичное загрязнение. Зеленые методы, такие как фиторемедиация, показывают успех в 60–85% случаев, используя гипераккумуляторы, такие как горчица индийская и подсолнечник, для извлечения или стабилизации металлов. Биоремедиация с использованием бактерий (Pseudomonas, Bacillus) и грибов преобразует металлы в менее токсичные формы, а электрокинетика эффективна для низкопроницаемых почв, удаляя металлы через электромиграцию. Нанотехнологии, включая нулевалентное железо, сокращают время обработки на 50%, а переработка ресурсов (гидрометаллургия, биовыщелачивание) позволяет извлекать ценные металлы, снижая затраты.

Кейс-стади бывшего завода по переработке батарей (5 га, концентрация свинца 500–15 000 мг/кг) показал, что интегрированный подход (выемка, промывка, фосфатная стабилизация, фитостабилизация) снизил затраты с $7,9 млн до $4,2 млн (47% экономии), удалил 65% свинца, стабилизировал 90% остаточного свинца и восстановил 90% растительного покрова. Мониторинг через 5 лет подтвердил отсутствие ремиграции свинца, улучшение микробного разнообразия и стабильность экосистемы. Экономический анализ выявил, что зеленые методы имеют более высокую долгосрочную выгоду за счет восстановления экосистемных услуг и роста стоимости земли. Регуляторные рамки, включающие штрафы и стимулы, увеличивают соблюдение на 40%, но требуют адаптации для поддержки инноваций.

Обсуждение

Загрязнение почв э-отходами от батарей и электродвигателей представляет глобальную проблему, требующую устойчивых решений. Интегрированные подходы, комбинирующие физические, химические и зеленые методы, показывают до 30% большую эффективность, чем одиночные технологии, как демонстрирует кейс-стади, где экономия составила 47% при снижении биодоступности свинца на 95%. Фиторемедиация и биоремедиация выделяются как экономически эффективные и экологически безопасные, восстанавливая микробное разнообразие и плодородие, но требуют нескольких сезонов и ограничены глубиной корней. Химические методы, такие как стабилизация, быстро снижают риски, но не решают проблему накопления металлов. Нанотехнологии сокращают время обработки, но их экологическая судьба требует изучения. Переработка ресурсов, включая биовыщелачивание, превращает ремедацию в ценность, поддерживая циркулярную экономику. Однако вызовы остаются: длительность зеленых методов, риски вторичного загрязнения химикатами и ограниченные данные о долгосрочных траекториях восстановления. Регуляторные барьеры, такие как отсутствие стандартов для зеленых технологий, затрудняют масштабирование. Будущие направления, включая генетически модифицированные растения и машинное обучение для оптимизации, обещают повысить эффективность, но требуют междисциплинарных исследований для оценки климатических и социальных факторов. Рекомендации включают приоритет профилактики через ответственный дизайн продукции, внедрение гибридных стратегий и усиление политики для поддержки инноваций и мониторинга.

Заключение

Проблема загрязнения почв тяжёлыми металлами, поступающими из отходов батарей и электродвигателей, представляет собой одну из наиболее острых экологических угроз XXI века.

Результаты анализа подтверждают, что традиционные физические и химические методы ремедиации, несмотря на высокую эффективность на локальных участках, остаются дорогостоящими, энергоёмкими и зачастую создают новые экологические риски, связанные с образованием вторичных отходов. В противоположность им, биологические и зеленые подходы, фиторемедиация, биоремедиация и электрокинетическая ремедиация, формируют основу устойчивого восстановления почвенных экосистем, обеспечивая долгосрочный экологический эффект при более низких экономических затратах.

Комплексный (интегрированный) подход, сочетающий физические, химические и биологические технологии, позволяет достигать наилучших результатов при снижении биодоступности тяжёлых металлов на 90–95 %, восстановлении микробного разнообразия и сокращении затрат до 40–50 % по сравнению с изолированными методами. Применение наноматериалов (например, нулевалентного железа и наноглин) ускоряет процессы иммобилизации металлов, а использование генетически модифицированных растений-гипераккумуляторов открывает перспективы повышения эффективности извлечения свинца, кадмия и меди.

Тем не менее, внедрение данных технологий сдерживается рядом ограничений — отсутствием единых нормативов для «зелёных» методов, дефицитом данных о долгосрочных последствиях применения наночастиц, а также региональными различиями в почвенно-климатических условиях и социально-экономических возможностях. Для преодоления этих барьеров необходимы междисциплинарные усилия, объединяющие экологов, биотехнологов, инженеров, экономистов и политиков.

В будущем развитие ремедиационных технологий должно идти по пути интеграции с системами искусственного интеллекта и цифрового мониторинга. Машинное обучение и сенсорные сети способны оптимизировать выбор методов ремедиации и прогнозировать экологические эффекты в реальном времени. Переход от реактивных мер к превентивным стратегиям — через внедрение циркулярной экономики, переработку ресурсов и «зеленое» проектирование продукции — позволит минимизировать образование э-отходов и снизить нагрузку на экосистемы.

Таким образом, устойчивое восстановление почв, загрязнённых отходами батарей и электродвигателей, требует перехода от фрагментарных решений к системному подходу, сочетающему инновации, науку и политику. Только синергия технологий, нормативного регулирования и международного сотрудничества позволит создать экологически безопасные, продуктивные и устойчивые почвенные экосистемы для будущих поколений.

Список литературы:

1. **Онифаде М., Зваривадза Т., Адеписи Дж. А., Саид К. О., Дайо-Олупона О., Лавал А. И., Кханделвал М.** Продвижение к устойчивости: появление зелёных горнодобывающих технологий и практик (*Advancing toward sustainability: The emergence of green mining technologies and practices*) // *Зелёная и интеллектуальная горная инженерия* (*Green and Smart Mining Engineering*). — 2024. — Т. 1, № 2. — С. 157–174.

2 . **Радж К., Дас А. П.** Загрязнение свинцом: влияние на окружающую среду и здоровье человека и подходы к устойчивым решениям (*Lead pollution: Impact on environment and human health and approach for a sustainable solution*) // *Экологическая химия и экотоксикология* (*Environmental Chemistry and Ecotoxicology*). — 2023. — Т. 5. — С. 79–85

3. **Кумар А., Диксит Г.** / Электронные отходы и их выщелачивание: воздействие на здоровье человека и окружающую среду — глобальная экологическая угроза и управление (*Electronic waste and their leachates impact on human health and environment: Global ecological threat and management*) //

Инновации в области экологических технологий (*Environmental Technology & Innovation*). — 2021. — Т. 24. — С. 697

4 . **Гаврилеску М.** Усиление фиторемедиации почв, загрязнённых тяжёлыми металлами (*Enhancing phytoremediation of soils contaminated with heavy metals*) // *Текущие направления биотехнологии* (*Current Opinion in Biotechnology*). — 2022. — Т. 74. — С. 21–31.

5 . **Шарма П., Пандей С.** Биоремедиация электронных отходов: текущее состояние и перспективы (*Bioremediation of electronic waste: Current status and future perspectives*) // *Биотехнология возобновляемых ресурсов* (*Bioresource Technology*). — 2023. — Т. 367. — С. 128

6 . **Ян А., Ван Ю., Тан С. Н., Мохд Юсоф М. Л., Гош С., Чен Ч.** Фиторемедиация: перспективный подход к рекультивации земель, загрязнённых тяжёлыми металлами (*Phytoremediation: A promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land*) // *Фроньеры науки о растениях* (*Frontiers in Plant Science*). — 2020. — Т. 11. — С. 359.

7 . **Оджуедери О. Б., Бабалола О. О.** Микробная и растительная биоремедиация загрязнённых тяжёлыми металлами сред: обзор (*Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: A review*) // *Международный журнал экологических исследований и общественного здоровья* (*International Journal of Environmental Research and Public Health*). — 2017. — Т. 14, № 12. — С. 1504.

8 . **Бардос Р. П., Джонс С., Стивенсон К., Менгер П., Бисли В., Томас Г.** Оптимизация ценности от повторного использования бывших промышленных территорий (*Optimising value from the soft re-use of brownfield sites*) // *Полная наука об окружающей среде* (*Science of The Total Environment*). — 2020. — Т. 704. — С. 135.

9 . **Болан Н., Кунихикришнан А., Тангараджан Р., Кумпиене Й., Парк Дж., Макино Т., Киркхам М. Б., Шекель К.** Ремедиация почв, загрязнённых тяжёлыми металлами: мобилизовать или иммобилизовать? (*Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils — To mobilize or to immobilize?*) // *Журнал опасных материалов* (*Journal of Hazardous Materials*). — 2014. — Т. 266. — С. 141–166.

10. **Вуана Р. А., Окиеймен Ф. Е.** Тяжёлые металлы в загрязнённых почвах: обзор источников, химии, рисков и лучших доступных стратегий ремедиации (*Heavy metals in contaminated soils: A review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation*) // *Экология ISRN* (*ISRN Ecology*). — 2011.