
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

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

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

Физические методы ремедиации, 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 ремедиацию 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 () // (). — 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 () // (). — 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 () //

-
- (). — 2021.
— Т. 24. — С. 697
- 4 . **Гаврилеску М.** Усиление фиторемедиации почв, загрязнённых тяжёлыми металлами () // (). — 2022. — Т. 74. — С. 21–31.
- 5 . **Шарма П., Пандей С.** Биоремедиация электронных отходов: текущее состояние и перспективы () // (). — 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 () // (). — 2020. — Т. 11. — С. 359.
- 7 . **Оджуедери О. Б., Бабалола О. О.** Микробная и растительная биоремедиация загрязнённых тяжёлыми металлами сред: обзор () // (). — 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 () // (). — 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? () // (). — 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 () // (). — 2011.