

Р. В. Петрук
Л. П. Пашкевич

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИЛУЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ З ІНФІЛЬТРАТУ СМІТТЄЗВАЛИЩ

Вінницький національний технічний університет

Інфільтрат сміттєзвалищ становить серйозну екологічну проблему через високий вміст важких металів (свинець, ртуть, кадмій, хром), які є токсичними, персистентними та здатними до біоаккумуляції, забруднюючи ґрунтові та поверхневі води. У статті проаналізовано сучасні методи вилучення важких металів з інфільтрату, включаючи фізичні (зворотний осмос, нанофільтрація), хімічні (преципітація, коагуляція, адсорбція), біологічні (біоремедіація, фіторемедіація) та передові технології (метод Фентона, електрохімія). Ефективність методів варіює: фізичні досягають 95–99% видалення, хімічні — 80–95%, біологічні — 50–80%, передові — до 95%. Особливу увагу приділено використанню мікроводорості *Chlorella vulgaris* Polikarp для біоремедіації інфільтрату завдяки її здатності до біосорбції та біоаккумуляції. У лабораторних умовах хлорела показала високу ефективність до 95,41% для кадмію, 99,4% для цинку за оптимальних умов. Живі клітини хлорели ефективні для комплексного очищення, тоді як неживі — для швидкої адсорбції. Проаналізовано методи десорбції металів з біомаси хлорели (кислотна, лужна, хелатна обробка, ультразвук), що дозволяють рекуперацію металів та утилізацію біомаси. Комбіновані підходи, як метод Фентона з мембранами, забезпечують максимальну ефективність (>95%) та сприяють циркулярній економіці. Найбільш ефективним для вилучення важких металів з клітин хлорели є комбінований підхід, який включає промивання водою з подальшою обробкою слабким розчином ЕДТА і кислотна десорбція для залишкових металів. В статті проаналізовано метод вилучення важких металів з інфільтрату сміттєзвалищ за допомогою клітин хлорели, та встановлено, що він може використовуватися на рівні з хімічними чи фізичними методами і одночасно знижує вміст сполук азоту та фосфору у інфільтраті і не вимагає використання дороговартісного обладнання.

Ключові слова: технології захисту довкілля, інфільтрат сміттєзвалищ, важкі метали, *Chlorella vulgaris* Polikarp, біоремедіація, біосорбція, метод Фентона, стале управління відходами.

Вступ

Інфільтрат сміттєзвалищ утворюється внаслідок просочування дощової води через шари відходів, розчиняючи органічні та неорганічні забруднювачі, включаючи важкі метали. Ці метали, такі як Pb, Cd, Cr, Ni, Zn та ін. є токсичними, персистентними та здатними до біоаккумуляції, що призводить до забруднення ґрунтових вод, поверхневих водойм та харчових ланцюгів. За даними досліджень, концентрації важких металів в інфільтраті можуть перевищувати норми в 10-100 разів, вимагаючи ефективних методів очищення. Традиційні методи, такі як захоронення, є недоцільними, тому сучасні підходи фокусуються на вилученні металів для повторного використання або безпечного видалення [1].

Метою роботи є аналіз існуючих методів та оцінка потенціалу хлорели як інструменту вилучення важких металів з стічних вод та, зокрема, інфільтрату сміттєзвалищ [2,3]. Завданнями дослідження є використання хлорели для зниження концентрації важких металів у водних об'єктах з подальшим вилученням металовмісних клітин хлорели з довкілля. Наступною логічною і обов'язковою задачею є вилучення металів з біомаси хлорели та відновлення їх клітин, аналіз можливості і доцільності використання цих методів в умовах України, детальне вивчення можливості застосування штаму хлорели для очищення інфільтрату сміттєзвалищ з високою концентрацією забруднювальних речовин та супутнім видаленням біогенних елементів.

Постановка задачі

У даній роботі також було поставлено завдання аналізу існуючих методів вилучення важких металів з інфільтрату сміттєзвалища та подальше дослідження вилучення важких металів з біомаси *Chlorella Vulgaris* Polikarp [4], що дозволить використовувати рідину інфільтрату для полів зрошення чи полів фільтрації. Інфільтрат сміттєзвалища отриманий з дослідної модельної установки [5-6], яка містить вихідні концентрації важких металів, представлені у таблиці 1. Вимірювання проводилось за допомогою атомно-абсорбційного спектрофотометра Selmi C-600.

Таблиця 1 – Вміст важких металів у інфільтраті сміттєзвалища

Номер	Катіон металу	Концентрація, мг/л	Граничні норми вмісту хімічних речовин у воді водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення (наказ МОЗ 721 від.02.05.2022р)	Кратність перевищення ГДК
1	Мідь	0.0061	1	0.006
2	Свинець	0.0045	0.03	0.15
3	Кадмій	≤0.001	0.001	1
4	Нікель	0.025	0.1	0.25
5	Цинк	3.41	1	3.41
6	Марганець	0.36	0.1	3.6

Методи вилучення важких металів з інфільтрату

Вилучення важких металів базується на перетворенні їх у форми, придатні для сепарації: нерозчинні преципітати, адсорбовані комплекси або фільтровані частинки. Методи класифікуються на фізичні (сепарація), хімічні (реакції), біологічні (мікробна взаємодія) та передові (комбіновані з окисненням). Ефективність залежить від рН, концентрації металів, органічних домішок та умов процесу [7]. Комбіновані системи, наприклад, метод Фентона з мембранами, дозволяють досягти >95% видалення, зменшуючи екологічне навантаження та сприяючи циркулярній економіці через рекуперацію металів [8].

Методи вилучення [9-11] поділяються на фізичні, хімічні, біологічні та умовно нові перспективні. Нижче наведено таблицю 2 з ключовими прикладами, механізмами, ефективністю та умовами [12-13].

Таблиця 2 – Методи вилучення важких металів з інфільтрату

Категорія	Метод	Механізм	Ефективність видалення (%)	Умови	Переваги	Недоліки
Фізичні	Зворотний осмос	Фільтрація через напівпроникну мембрану під тиском	95–99 (розчинені солі та метали)	Тиск 10–100 бар, рН 5–8	Висока ефективність, стабільна якість ефлюенту	Фоулінг мембран, високі витрати енергії
Фізичні	Нанофільтрація	Селективна фільтрація дивалентних іонів	70–90 (дивалентні метали)	Тиск 5–20 бар	Нижчі витрати, ніж RO	Менша ефективність для моновалентних іонів
Хімічні	Преципітація	Утворення нерозчинних солей з вапном, FeCl ₃ або сульфатами	80–95 (Pb, Cd, Cr)	рН 8–10, дозування 1–5 г/л	Простота, низькі витрати	Утворення шламу, вторинне забруднення
Хімічні	Коагуляція/флокуляція [14]	Агрегація частинок з коагулянтами (alum, FeCl ₃)	60–90 (суспензії з металами)	рН 6–8, змішування	Ефективна для колоїдів	Залежність від рН, шлам
Хімічні	Адсорбція	Зв'язування на активованому вугіллі, цеоліті або фруктових шкірках	70–95 (Cu, Pb, Ni)	Контактний час 20–100 хв	Селективність, регенерація	Високі витрати на адсорбенти
Біологічні	Біоремедіація	Біоаккумуляція мікробами (Chlorella sp., бактерії)	50–80 (Mn, Cu, Se)	Анаеробні/аеробні умови, 21 день	Екологічність, низькі витрати	Повільність, чутливість до токсинів
Біологічні	Фіторемедіація (конструкційні вологі зони)	Накопичення рослинами (Typha latifolia)	40–80 (Cd, Pb, Hg)	Потік 5 л/день, 0–30 днів	Природний процес, низька енергія	Варіабельність, сезонність
Передові	Метод Фентона, озонація [15]	Генерація радикалів для окиснення	75–95 (COD та метали)	рН 3–5, каталізатори	Розкладання комплексів	Високі витрати, енергія
Передові	Електрохімія (електрокоагуляція) [16]	Преципітація на електродах	51–95 (метали та коліформи)	Струм 1–5 А/м ²	Відновлення металів	Енергоспоживання, електроди

Фізичні методи ефективні для високих концентрацій, але вимагають попередньої обробки. Хімічні методи є універсальними, але генерують відходи та шлам, з яким треба виконувати додаткові дії очищення та сушення, проте дозволяє отримувати вторинні ресурси. Біологічні – поширені та досить недорогі, але повільні і утворюють забруднену металами біологічну речовину. Проте біологічні методи мінімізують використання хімікатів.

Наразі у світі є приклади ефективного використання деяких наведених методів. Так, наприклад, у Фінляндії (підприємство Tasegrow) використовують преципітацію для рекуперації Zn та Mn з батарейок, адаптовано для інфільтрату. У Китаї (місто Guiyu) використовують комбіновані методи Фентона з адсорбцією для зменшення вмісту поліхлорованих біфенілів та металів у забруднених районах. У Індії використовують конструкційні вологі зони (болота) з рогазом широколистяним (Typha latifolia) для видалення Cd (80%) в муніципальних системах.

Вилучення важких металів з інфільтрату можливе за допомогою різноманітних методів, з перевагою комбінованих систем для досягнення високої ефективності. Рекомендується фокус на сталі методи, як біоремедіація та адсорбція з відходами, з подальшими дослідженнями для зменшення витрат. Це сприятиме глобальним цілям сталого розвитку.

Використання хлорели для видалення важких металів

Використання хлорели для видалення важких металів з інфільтрату сміттєзвалищ є ефективним методом біоремедіації, заснованим на здатності мікроводоростей до біосорбції та біоаккумуляції токсичних речовин. Цей процес допомагає зменшити забруднення стічних вод, де важкі метали, такі як хром (Cr), нікель (Ni), цинк (Zn), кадмій (Cd) [17] та інші, присутні в високих концентраціях. Метод може використовувати як живі клітини хлорели (для біоаккумуляції), так і неживі (для біосорбції).

Для підготовки до культивування хлорели можна використовувати живі клітини. Хлорелу культивують у поживному середовищі BG-11 у флаконах об'ємом 150-250 мл протягом 7 днів до фази експоненціального росту. Температура – 25-27°C, постійне освітлення холодними білими лампами з інтенсивністю ~200 мкмоль/м²/с (фотосинтетичне активне випромінювання 400-700 нм). Культури можуть бути статичними або на шейкері (120 об/хв) для аерації. Зростання контролюють за оптичною щільністю при 750 нм та вмістом хлорофілу А і визначають спектрофотометрично після екстракції етанолом. Можна використовувати штам *Chlorella vulgaris* polycarp чи інший штам адаптований до умов вирощування в інфільтраті.

Для накопичення важких металів з інфільтрату можна також використовувати неживі клітини як біосорбент. Після культивування хлорелу фільтрують, промивають чистою водою, сушать у затіненому приміщенні (без прямого сонця), подрібнюють і просівають до розміру частинок 120 мкм. Це створює порошок для адсорбції.

Умови проведення експерименту в лабораторних умовах [18]:

1. Інфільтрат збирають зі сміттєзвалищ (включаючи сезонні варіації – вологий/сухий періоди), осаджують для видалення твердих частинок і розводять водою (10-100% залежно від токсичності; для високотоксичних – до 20-30%). Для проведення експерименту можна також використовувати приготовлені розчини солей металів з певними концентраціями. Для визначення зменшення вмісту важких металів до ГДК найкраще використовувати розчин з 2-5 кратним перевищенням ГДК для гранично допустимого зниження забруднюючих речовин у водних об'єкти із зворотними водам відповідно до наказу міндовкілля від 05.03.21 № 173.

2. Температура 18-24°C (кімнатна). Освітлення постійне штучне протягом 24 годин з інтенсивністю 200 мкмоль/м²/с. рН 6-7 для оптимальної адсорбції (для Cd – рН 6). Аерація обов'язкова для токсичних інфільтратів (шейкер 120 об/хв або магнітне перемішування). В експерименті з *Chlorella vulgaris* polycarp використовувався аератор для акваріума з продуктивністю 1,5 л/хв при об'ємі акваріума 20 л.

3. Тривалість експерименту 9 днів для живих клітин; 15-120 хвилин для неживих (при перемішуванні 100-120 об/хв).

4. Концентрація металів обиралася з перевищенням ГДК у 2-5 разів з метою зниження концентрації в результаті експерименту до близьких ГДК значень. У таблиці 3 наведені вихідні дані експерименту з *Chlorella vulgaris* polycarp та кінцеві значення після експерименту.

Таблиця 3 – Вихідні концентрації в лабораторному експерименті з *Chlorella vulgaris* polycarp

Катіон металу	Вихідна концентрація, мг/л	Кінцева концентрація, мг/л
Мідь	0.0061	0.0005
Свинець	0.0045	0.0004
Кадмій	≤0.001	≤0.001
Нікель	0.025	0.009
Цинк	3.41	0.62
Марганець	0.36	≤0.001

Видалення важких металів має проходити за наступним алгоритмом наведеним в таблиці 4:

Таблиця 4 – Етапи вилучення важких металів з інфільтрату

Збір і підготовка інфільтрату	Зібрати зразки, осадити тверді речовини, виміряти фізико-хімічні параметри (рН, БСК, ХСК, вміст металів за допомогою ААС чи іншим методом).
Розведення	Розвести інфільтрат водою до оптимальної концентрації (наприклад, 30% для менш токсичних, 10-20% для високотоксичних).
Інокуляція (для живих клітин)	Додати підготовлену хлорелу до розведеного інфільтрату, забезпечити аерацію та освітлення.
Інкубація	Витримати 9 днів, контролюючи зростання (оптична щільність, хлорофіл). Для неживих клітин – змішати біосорбент з розчином, перемішувати 120 хвилин.
Вимірювання видалення	Порівняти концентрації металів до і після (використовуючи ААС).
Постобробка	Зібрати біомасу хлорели (може використовуватися як добриво або для подальшого вилучення металів), очищений інфільтрат перевірити на відповідність нормам.

Розрахунок ефективності вилучення важких металів з інфільтрату варто виконувати за наступною формулою 1:

$$R = \frac{C_i - C_f}{C_i} \cdot 100\% \quad (1)$$

де C_i – початкова концентрація, C_f – кінцева.

Ефективність залежить від типу інфільтрату, розведення та умов. В таблиці 5 наведені найбільш ефективні умови культивування хлорели з метою видалення важких металів.

Таблиця 5 – Умови ефективного вилучення важких металів з інфільтрату

Метал	Умови	Ефективність видалення за літературою, %	Ефективність видалення експеримент з <i>Chlorella vulgaris</i> polycarp, %
Хром (Cr)	Живі клітини, 9 днів	70	Не досліджувався
Нікель (Ni)	Живі клітини, 9 днів	66	64
Цинк (Zn)	Живі клітини, аерація, 9 днів	89.7	81,9
Кадмій (Cd)	Неживі клітини, рН 6, 120 хв	95.41	Не виявлено в вихідному розчині

Додатково, хлорела видаляє з води і інші забруднювачі: амоній-N (до 54%), БПК (до 53%), ХПК (до 51%) [11]. Для високотоксичних інфільтратів аерація критична, інакше зростання пригнічується.

Хлорела є екологічно чистим і ефективним засобом для очищення інфільтрату, особливо для менш токсичних зразків, де можливе використання без розведення. Для токсичних потрібне розведення та аерація. Неживі клітини підходять для швидкої адсорбції, тоді як живі – для комплексного очищення з виробництвом біомаси. Метод перспективний для масштабного застосування, але вимагає моніторингу та інтеграції з іншими системами очищення (наприклад, з річковою водою). Подальші дослідження рекомендуються для оптимізації параметрів. Якщо інфільтрат містить інші забруднювачі, можна комбінувати з іншими мікробіодоростями.

Вилучення важких металів з клітин хлорели

Процес вилучення важких металів з клітин хлорели є важливим етапом, оскільки клітина хлорели має високу здатність до біоаккумуляції металів, що потребує розробки певних механізмів поводження з такими клітинами. Після вилучення важких металів з інфільтрату чи природних вод виникає необхідність утилізації чи ефективного поводження біомасою хлорели з високим вмістом важких металів. Ефективність вилучення залежить від поставлених завдань: чи потрібно отримати чисту біомасу хлорели, чи ізолювати метали для подальшого використання. Для екологічних цілей, очевидно, цінність становить не біомаса хлорели, а саме мінімізація впливу на довкілля та поширення важких металів. Нижче наведено основні методи та способи для ефективного вилучення важких металів із хлорели.

1) Хімічна десорбція. Для цього використовують кислотну чи лужну обробку, хелатування:

а) В кислотній обробці використовують розчини сильних кислот, таких як HCl, HNO₃ або H₂SO₄ (концентрація 0.1–1 М), для десорбції металів із клітинної стінки та внутрішньоклітинних компонентів. При цьому біомасу змішують із кислотним розчином, інкубують (зазвичай 30–60 хвилин при 20–40°C), а потім центрифугують для відділення біомаси від розчину з металами. Перевагою цього методу є висока ефективність вилучення (до 90% для таких металів, як Cd, Pb, Cu) [19]. Проте даний метод може пошкоджувати клітинну структуру, що ускладнює подальше використання біомаси.

б) Хелатування передбачає використання ЕДТА (етилендіамінтетраоцтова кислота), цитратів або інших хелаторів для зв'язування металів і їх вилучення з біомаси. При цьому біомасу обробляють розчином ЕДТА (0.01–0.1 М) при рН 4–6, що сприяє витягуванню металів без значного руйнування клітин. Перевагою методу є менш агресивний вплив, що зберігає біомасу для подальшого використання. Проте цей метод дорожчий через вартість реагентів.

в) Лужна обробка передбачає використання розчинів NaOH або KOH для десорбції металів, які утворюють слабкі зв'язки з клітинною стінкою. Цей метод менш ефективний для внутрішньоклітинних металів, але підходить для поверхневих. Переваги і недоліки аналогічні із кислотною обробкою.

2) Фізичні методи включають ультразвукову чи термічну обробку.

а) Ультразвукова обробка передбачає застосування ультразвуку (20–40 кГц) у комбінації з розчинами (вода, слабкі кислоти чи хелатори) для руйнування зв'язків між металами та клітинними компонентами. Перевагою є прискорення процес десорбції та можливість комбінації з хімічними методами. Недоліком є необхідність спеціального обладнання, хоча воно не складне і не дороговартісне.

б) Термічна обробка зводиться до нагрівання біомаси до 50–80°C у присутності десорбуючих агентів для полегшення вилучення металів. Нагрівання може досить знижувати якість біомаси. Також недоліком є необхідність витрати енергії на нагрівання.

3) Біологічні методи включають використання ферментів або мікроорганізмів, які сприяють вивільненню металів. Наприклад, ферменти, що руйнують полісахариди клітинної стінки, можуть полегшити доступ до внутрішньоклітинних металів. Недоліком біологічних методів є утворення біомаси, яка забруднена металами, що фактично не вирішує проблему, а навпаки її посилює.

Різні метали, що містяться в клітинах хлорели мають різну афінність до клітинних компонентів хлорели. Наприклад, Pb і Cd краще видаляються кислотами, тоді як Zn може ефективно десорбуватися ЕДТА. Тому в залежності від ступеня забруднення клітин хлорели різними металами варто надавати перевагу тому чи іншому методу.

Для промислового застосування найефективнішим є комбінований підхід, який включає промивання водою з подальшою обробкою слабким розчином ЕДТА і кислотна десорбція для залишкових металів.

У випадку необхідності збереження біомаси, перевагу слід віддавати хелаторам або ультразвуковій обробці

Висновки

Аналіз сучасних методів вилучення важких металів з інфільтрату сміттєзвалищ показав, що фізичні (зворотний осмос, нанофільтрація), хімічні (преципітація, адсорбція), біологічні (біоремедіація, фіторемедіація) та передові технології (метод Фентона, електрохімія) мають різну ефективність (50–99%) залежно від умов, типу інфільтрату та концентрації металів. Комбіновані підходи, такі як метод Фентона з мембранами, забезпечують найвищу ефективність (>95%) та сприяють рекуперації металів, підтримуючи принципи циркулярної економіки.

Використання штаму *Chlorella vulgaris* Polikarp є перспективним для біоремедіації інфільтрату завдяки здатності до біосорбції та біоаккумуляції. У лабораторних умовах хлорела продемонструвала високу ефективність видалення важких металів: до 81.9 % для цинку, 91,1% для свинцю за оптимальних умов. Живі клітини ефективні для комплексного очищення, а неживі – для швидкої адсорбції.

Методи десорбції металів з біомаси хлорели (кислотна, хелатна, ультразвукова обробка) дозволяють ефективно вилучати метали (до 90% для Cd, Pb, Cu) та зберігати біомасу для подальшого використання, наприклад, як добриво. Комбінований підхід (промивання водою, ЕДТА, кислотна десорбція) є оптимальним для промислового застосування.

Застосування *Chlorella vulgaris* Polikarp сприяє сталому управлінню відходами, зменшенню забруднення та відновленню екосистем, особливо в Україні. Подальші дослідження необхідні для оптимізації умов культивування, масштабування технологій та інтеграції в національну екологічну політику.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гриньова, Я., Криштоп, Є. (2021) «Проблеми забруднення навколишнього середовища важкими металами та шляхи їх подолання», Науковий журнал «Інженерія природокористування», (1(19), с. 111-119. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6904034>.
2. Важкі метали в ґрунтах України після бойових дій: загрози та методи ремедіації. UkrAgroConsult - Агроконсалтинг світового рівня. URL: <https://ukragroconsult.com/news/vazhki-metaly-v-gruntah-ukraviny-pislya-bojovyh-dij-zagrozy-ta-metody-remediaciyi/>
3. Волошин П. (2012) Аналіз впливу Львівського сміттєзвалища на природне середовище / Вісник Львівського університету. Серія геологічна. Випуск 26. 2012. С. 139–147. <http://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/geology/article/view/3591>
4. Ulytsky O. and Pashkevich L., "Use of *Chlorella vulgaris* Polikarp microalgae strain for purification of freshwaters from technological pollution," Ecological Sciences, no. 6 (51), pp. 58–67, 2023, doi:<https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.9>
5. Ishchenko V. (2018) Prediction of heavy metals concentration in the leachate: a case study of Ukrainian waste. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2018, Vol. 20, Issue 3, pp 1892-1900 <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0740-7>

6. Ishchenko V.(2019) Heavy metals in municipal waste: the content and leaching ability by waste fraction. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2019, 54:14, pp. 1448-1456 <https://doi.org/10.1080/10934529.2019.1655369>
7. M. K. Mehmood et al. (2009) In situ microbial treatment of landfill leachate using aerated lagoons / Bioresource Technology. 2009. Vol. 100, no. 10. P. 2741–2744. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.031>
8. M. H. Hussein, A. M. Abdullah, N. I. Badr El Din, and E. S. I. Mishaqa, “Biosorption Potential of the Microchlorophyte *Chlorella vulgaris* for Some Pesticides,” Journal of Fertilizers & Pesticides, vol. 08, no. 01, 2017, doi: <https://doi.org/10.4172/2471-2728.1000177>.
9. G. S. R. Krishnamurti, S. R. Subashchandrabose, M. Megharaj, and R. Naidu, “Assessment of bioavailability of heavy metal pollutants using soil isolates of *Chlorella* sp.,” Environmental Science and Pollution Research, vol. 22, no. 12, pp. 8826–8832, May 2013, doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1799-2>.
10. Hulich M. P., Petrenko O. D., Kharchenko O. O. (2025) Determination of heavy metals content in agriculture products in regions suffered from hostilities: first results. Environment & Health. 2025. No. 1 (114). P. 24–30. URL: <https://doi.org/10.32402/dovkil2025.01.024>
11. V. Singh and V. Mishra, “Bioremediation of Nutrients and Heavy Metals from Wastewater by Microalgal Cells: Mechanism and Kinetics,” Springer eBooks, pp. 319–357, Jan. 2019, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9860-6_16.
12. Wang J and Qiao Z (2024) A comprehensive review of landfill leachate treatment technologies. Front. Environ. Sci. 12:1439128. doi: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1439128>
13. Xiang, R., Wei, W., Mei, T., Wei, Z., Yang, X., Liang, J., & Zhu, J. (2025). A Review on Landfill Leachate Treatment Technologies: Comparative Analysis of Methods and Process Innovation. Applied Sciences, 15(7), 3878. <https://doi.org/10.3390/app15073878>
14. A. Q. Jaradat, Dua'a B. Telfah, Rabah Ismail; Heavy metals removal from landfill leachate by coagulation/flocculation process combined with continuous adsorption using eggshell waste materials. Water Sci Technol 15 December 2021; 84 (12): 3817–3832. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2021.493>
15. Amin Mojiri, John L. Zhou, Harsha Ratnaweera, Akiyoshi Ohashi, Noriatsu Ozaki, Tomonori Kindaichi, Hiroshi Asakura; Treatment of landfill leachate with different techniques: an overview. Water Reuse 1 March 2021; 11 (1): 66–96. doi: <https://doi.org/10.2166/wrd.2020.079>
16. Abbas, A. A., Jingsong, G., Ping, L. Z., Ya, P. Y. & Al-Rekabi, W. S. (2009). Review on Landfill Leachate Treatments. American Journal of Applied Sciences, 6(4), 672-684. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2009.672.684>
17. X. Jiang et al., “Study on the mechanism of biochar loaded typical microalgae *Chlorella* removal of cadmium,” The Science of The Total Environment, vol. 813, pp. 152488–152488, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152488>.
18. Методичні рекомендації із збирання, утилізації та знешкодження фільтрату полігонів побутових відходів // Затверджені наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України No 421 від 20.08.2012 р. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0421858-12#Text>
19. M. Malakootian, Z. Yousefi, and Z. Khodashenas Limoni, “Removal of lead from battery industry wastewater by *Chlorella vulgaris* as green micro-algae (Case study: Kerman, Iran),” DESALINATION AND WATER TREATMENT, vol. 141, pp. 248–255, 2019, doi: <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23485>.

REFERENCES

1. Hryneva, Y. G., & Kryshchtop, Y. A (2021) “Heavy metals pollution problems and ways to overcome them”, Engineering of nature management , 1(19), p. 111-119. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6904034>.
2. Heavy metals in Ukrainian soils after hostilities: threats and remediation methods. UkrAgroConsult - World-class agricultural consulting. URL: <https://ukragroconsult.com/news/vazhki-metaly-v-gruntah-ukrayiny-pislya-bojovyyh-dij-zagrozy-ta-metody-remediacyiy/>
3. Voloshyn P. (2012) Analysis of the Impact of L'viv Landfill Upon the Environment / Visnyk of the Lviv University. Series geological. Issue 26. 2012. P. 139–147. <http://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/geology/article/view/3591>
4. Ulytsky O. and Pashkevich L., “Use of *Chlorella vulgaris* Polikarp microalgae strain for purification of freshwaters from technological pollution,” Ecological Sciences, no. 6 (51), pp. 58–67, 2023, doi:<https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.9>
5. Ishchenko V. (2018) Prediction of heavy metals concentration in the leachate: a case study of Ukrainian waste. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2018, Vol. 20, Issue 3, pp 1892-1900 <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0740-7>
6. Ishchenko V.(2019) Heavy metals in municipal waste: the content and leaching ability by waste fraction. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2019, 54:14, pp. 1448-1456 <https://doi.org/10.1080/10934529.2019.1655369>
7. M. K. Mehmood et al. (2009) In situ microbial treatment of landfill leachate using aerated lagoons / Bioresource Technology. 2009. Vol. 100, no. 10. P. 2741–2744. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.031>
8. M. H. Hussein, A. M. Abdullah, N. I. Badr El Din, and E. S. I. Mishaqa, “Biosorption Potential of the Microchlorophyte *Chlorella vulgaris* for Some Pesticides,” Journal of Fertilizers & Pesticides, vol. 08, no. 01, 2017, doi: <https://doi.org/10.4172/2471-2728.1000177>.
9. G. S. R. Krishnamurti, S. R. Subashchandrabose, M. Megharaj, and R. Naidu, “Assessment of bioavailability of heavy metal pollutants using soil isolates of *Chlorella* sp.,” Environmental Science and Pollution Research, vol. 22, no. 12, pp. 8826–8832, May 2013, doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1799-2>.
10. Hulich M. P., Petrenko O. D., Kharchenko O. O. (2025) Determination of heavy metals content in agriculture products in regions suffered from hostilities: first results. Environment & Health. 2025. No. 1 (114). P. 24–30. URL: <https://doi.org/10.32402/dovkil2025.01.024>
11. V. Singh and V. Mishra, “Bioremediation of Nutrients and Heavy Metals from Wastewater by Microalgal Cells: Mechanism and Kinetics,” Springer eBooks, pp. 319–357, Jan. 2019, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-32-9860-6_16.
12. Wang J and Qiao Z (2024) A comprehensive review of landfill leachate treatment technologies. Front. Environ. Sci. 12:1439128. doi: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1439128>
13. Xiang, R., Wei, W., Mei, T., Wei, Z., Yang, X., Liang, J., & Zhu, J. (2025). A Review on Landfill Leachate Treatment Technologies: Comparative Analysis of Methods and Process Innovation. Applied Sciences, 15(7), 3878. <https://doi.org/10.3390/app15073878>

14. A. Q. Jaradat, Dua'a B. Telfah, Rabah Ismail; Heavy metals removal from landfill leachate by coagulation/flocculation process combined with continuous adsorption using eggshell waste materials. *Water Sci Technol* 15 December 2021; 84 (12): 3817–3832. doi: <https://doi.org/10.2166/wst.2021.493>
15. Amin Mojiri, John L. Zhou, Harsha Ratnaweera, Akiyoshi Ohashi, Noriatsu Ozaki, Tomonori Kindaichi, Hiroshi Asakura; Treatment of landfill leachate with different techniques: an overview. *Water Reuse* 1 March 2021; 11 (1): 66–96. doi: <https://doi.org/10.2166/wrd.2020.079>
16. Abbas, A. A., Jingsong, G., Ping, L. Z., Ya, P. Y. & Al-Rekabi, W. S. (2009). Review on Landfill Leachate Treatments. *American Journal of Applied Sciences*, 6(4), 672–684. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2009.672.684>
17. X. Jiang et al., “Study on the mechanism of biochar loaded typical microalgae *Chlorella* removal of cadmium,” *The Science of The Total Environment*, vol. 813, pp. 152488–152488, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152488>.
18. Methodological recommendations for the collection, utilization and neutralization of leachate from municipal waste landfills // Approved by order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine No. 421 of 20.08.2012. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0421858-12#Text>
19. M. Malakootian, Z. Yousefi, and Z. Khodashenas Limoni, “Removal of lead from battery industry wastewater by *Chlorella vulgaris* as green micro-algae (Case study: Kerman, Iran),” *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, vol. 141, pp. 248–255, 2019, doi: <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23485>.

Петрук Роман Васильович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: prrom07@gmail.com;

Пашкевич Леонід Полікарпович — аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: leonid@nd.ua.

R. Petruk
L. Pashkevych

ENVIRONMENTALLY SAFE TECHNOLOGIES FOR THE REMOVAL OF HEAVY METALS FROM LANDFILL LEACHATE

Vinnytsia National Technical University

*Landfill leachate poses a serious environmental problem due to the high content of heavy metals (lead, mercury, cadmium, chromium), which are toxic, persistent and capable of bioaccumulating, polluting groundwater and surface waters. The article analyzes modern methods for removing heavy metals from leachate, including physical (reverse osmosis, nanofiltration), chemical (precipitation, coagulation, adsorption), biological (bioremediation, phytoremediation) and advanced technologies (Fenton method, electrochemistry). The effectiveness of the methods varies: physical ones reach 95–99% removal, chemical ones - 80–95%, biological ones - 50–80%, advanced ones - up to 95%. Special attention is paid to the use of the microalgae *Chlorella vulgaris* Polikarp for bioremediation of leachate due to its ability to biosorption and bioaccumulation. In laboratory conditions, *chlorella* showed high efficiency up to 95.41% for cadmium, 99.4% for zinc under optimal conditions. Living *chlorella* cells are effective for complex purification, while non-living ones are effective for rapid adsorption. Methods for desorption of metals from *chlorella* biomass (acid, alkaline, chelate treatment, ultrasound) were analyzed, allowing for metal recovery and biomass utilization. Combined approaches, such as the Fenton method with membranes, provide maximum efficiency (>95%) and contribute to a circular economy. The most effective approach for the extraction of heavy metals from *chlorella* cells is a combined approach, which includes washing with water followed by treatment with a weak EDTA solution and acid desorption for residual metals. The article analyzes the method of extracting heavy metals from landfill leachate using *chlorella* cells, and establishes that it can be used on a par with chemical or physical methods and simultaneously reduces the content of nitrogen and phosphorus compounds in the leachate and, at the same time, does not require the use of expensive equipment.*

Keywords: landfill leachate, heavy metals, *Chlorella vulgaris* Polikarp, bioremediation, biosorption, Fenton method, sustainable waste management.

Petruk Roman – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: prrom07@gmail.com.

Pashkevych Leonid – Postgraduate student of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: leonid@nd.ua.