

ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРИРОДООХОРОННИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИКОРИСТАННЯ ШТАМУ МІКРОВОДОРОСТІ CHLORELLA VULGARIS POLIKARP

¹ Вінницький національний технічний університет

Досліджено потенціал хлорели (штам *Chlorella Vulgaris Polikarp*) як універсального інструменту для вирішення екологічних проблем України, зокрема в контексті біоремедіації ґрунтів, очищення стічних вод і вловлювання вуглекислого газу (CO₂). У статті проаналізовано сучасні технології, які використовують хлорелу для вирішення екологічних викликів. Зокрема, розглянуто застосування фотобіореакторів для культивування хлорели в контрольованих умовах, біопрепаратів на основі цієї мікроводорості для відновлення деградованих ґрунтів, а також систем для очищення промислових і комунальних стічних вод. Особливо висвітлено локальні дослідження в Україні, які демонструють ефективність хлорели у зниженні вмісту нафтопродуктів, фенолів і важких металів у ґрунтах, забруднених унаслідок воєнних дій, а також її використання в біотехнологічних процесах для уловлювання CO₂ на промислових об'єктах, що сприяє зменшенню парникового ефекту. Стаття підкреслює стратегічну роль хлорели у відновленні екосистем України, особливо в регіонах, що постраждали від антропогенного впливу та воєнних дій. Використання хлорели може не лише сприяти очищенню довкілля, але й забезпечити економічні вигоди через створення нових біотехнологічних продуктів. У контексті глобальних екологічних викликів, таких як зміна клімату та деградація природних ресурсів, хлорела розглядається як ключовий елемент у досягненні сталого розвитку України. У статті наголошується на необхідності подальших досліджень і державної підтримки для масштабування цих технологій, а також їхньої інтеграції в національну екологічну політику. Вперше проведено детальне дослідження еколого-економічної доцільності застосування штаму мікроводорості *Chlorella Vulgaris Polikarp* для вирішення екологічних проблем України, зокрема в контексті біоремедіації ґрунтів, очищення стічних вод і вловлювання вуглекислого газу (CO₂). Встановлено, що на сучасному етапі економічно доцільним є використання хлорели для зниження вмісту важких металів у природних водах.

Ключові слова: екологічна безпека, природоохоронні технології, *Chlorella Vulgaris Polikarp*, хлорела, іони важких металів.

Вступ

Зростання антропогенного впливу на довкілля, зокрема забруднення ґрунтів, водних ресурсів і атмосфери, вимагає розробки ефективних і екологічно безпечних методів відновлення екосистем. Хлорела (*Chlorella Vulgaris Polikarp*) [1], одноклітинна зелена мікроводорість, вирізняється унікальними властивостями, що зумовлює її використання, як перспективного агента для охорони довкілля. Завдяки високій швидкості фотосинтезу, здатності поглинати CO₂, важкі метали, пестициди та органічні забруднювачі, а також можливості культивування на відходах, хлорела знаходить застосування в біоремедіації, очищенні стічних вод і зменшенні парникового ефекту. Особливо актуальним є використання штамів хлорели в Україні, де воєнні дії спричинили значне забруднення ґрунтів і водойм. У дослідженні аналізуються наукові літературні джерела щодо сучасних методів використання хлорели в екологічних технологіях, зокрема біоремедіації, вловлювання CO₂ і перероблення відходів, а також еколого-економічного аналізу доцільності їх впровадження.

Метою роботи є аналіз літературних джерел та оцінка потенціалу хлорели як інструменту ста-лого розвитку, враховуючи її ефективність, економічні аспекти та виклики масштабування в умовах сучасних екологічних проблем. Завданнями дослідження є використання хлорели для охорони довкілля, еколого-економічне порівняння можливості та доцільності використання цих методів в умовах України, детальне вивчення можливості застосування штаму хлорели для очищення водних об'єктів та природних вод від важких металів, біогенних елементів, а також можливості її викорис-тання для зменшення цвітіння природних вод та збільшення їхньої прозорості; аналіз методів вне-сення хлорели в об'єкти довкілля.

У роботі також поставлено завдання обґрунтування перспектив використання штаму *Chlorella Vulgaris Polikarp* для охорони довкілля з урахуванням комерційної привабливості запропонованих методів. Розроблена установка [1] та штам мікроводорості хлорели дозволяють отримувати суспензії та розчини активної хлорели з досить низькою собівартістю та специфічними властивостями, які можна і доцільно використовувати для природоохоронних цілей. Одним із завдань дослідження є підбір найефективнішої сфери застосування отриманого штаму з комерційною вигодою.

Біологічна характеристика *Chlorella Vulgaris Polikarp*

Хлорела — прісноводна фотосинтезувальна мікроводорість з високою концентрацією хлорофілу. Вона розмножується вегетативно, має високу біомасу за короткий період подвоєння (в межах доби). Штам *Chlorella Vulgaris Polikarp* має певні особливості, які відрізняють її від «стандартного» виду через цілеспрямовану селекцію чи можливість адаптації до певних умов, що може бути використано для конкретних завдань охорони довкілля. За допомогою установки з вирощування штаму [1] можна отримати акліматизовані і адаптовані до певних умов клітини, які у разі внесення в довкілля ефек-тивніше і швидше будуть виконувати свою функцію. Установка з вирощування мікроводоростей запатентована патентом на корисну модель України № 126380 «Автоматизований комплекс по ви-рощуванню мікроводоростей «biodrum».

В науковій літературі зустрічаються такі основні напрямки застосування хлорели для цілей охо-рони довкілля:

1. Можливість очищення стічних вод та поглинання азоту і фосфору, знешкодження важких ме-талів, а також фотосинтетичного збагачення киснем у біореакторах. Особливо важливе екологічне значення має саме можливість накопичувати важкі метали та переводити їх у нерухомі форми, тим самим виключати їх з кругообігу та суттєвого впливу на екосистеми [2].

2. Біоремедіація забруднених ґрунтів при цьому покращує структуру ґрунту, активізує діяльність ґрунтової мікробіоти та знижує токсичність пестицидів і металів. Оскільки хлорела — водний орга-нізм, то у ґрунті її ефективність досить низька, проте для певних ґрунтів може бути також викорис-тана. Дослідження в цій галузі фрагментарні, але перспективні [3].

3. Боротьба з парниковими газами. Хлорела здатна поглинати CO₂ з повітря чи з технологічних газів і фіксувати його у вигляді органічної біомаси. Особливо цікавим є розробка технологій погли-нання вуглекислого газу промислових підприємств, які можуть мати комерційний інтерес у вироб-ничому секторі та енергетиці [4].

4. Біоенергетика. Хлорела є перспективним джерелом біопалива (біодизель, біогаз), добрив або кормових добавок після отримання енергії. Наразі існують технології, які дозволяють центрифугу-вати клітини хлорели та вилучати з них певні білки чи вуглеводи, залишаючи клітину життєздат-ною. Вилучені речовини можна використовувати для потреб енергетики.

Серед зазначених можливостей використання хлорели найбільше використання наразі має пер-ший метод, який передбачає поліпшення якості природних вод під впливом хлорели як універсаль-ного інструменту у вирішенні екологічних проблем. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію технологічних параметрів, зниження вартості процесів та підвищення їхньої ефек-тивності [5], [6].

Методи застосування штамів хлорели

Методи внесення хлорели у об'єкти довкілля для їх очищення (біоремедіації ґрунтів, очищення стічних вод, вловлювання CO₂) різноманітні та залежать від типу об'єкта, завдань очищення та умов застосування. На основі сучасних досліджень [7]—[12], зокрема тих, що стосуються використання хлорели в екологічних технологіях, можна виділити такі основні методи внесення:

1. Внесення суспензії живих клітин хлорели. Суспензію живих клітин хлорели, вирощених у контрольованих умовах (наприклад, у фотобіореакторах), вносять безпосередньо в об'єкт довкілля, такий як ґрунт, водойми або стічні води. Суспензію зазвичай готують у рідкому поживному середовищі з високою концентрацією клітин ($10^6 \dots 10^8$ клітин/мл). Такий метод можна застосовувати для біоремедіації ґрунтів, де суспензію розпилюють або змішують із зрошувальною водою для рівномірного розподілу в ґрунті. Дослідження [13] показало, що внесення суспензії *Chlorella vulgaris* у забруднені нафтопродуктами ґрунти сприяло зниженню їх вмісту на 40... 60 % за 60 днів. Також цей метод можна використовувати для очищення стічних вод, де суспензію додають у резервуари зі стічними водами для видалення азоту, фосфору та важких металів. Наприклад, у [14] повідомили про 80 % видалення нітратів із комунальних стоків за 7 днів.

Метод простий у застосуванні, швидко поширює клітини та має високу біологічну активність, проте чутливий до зовнішніх умов (температура, рН, контамінація) та потребує регулярного внесення хлорели.

2. Використання біопрепаратів на основі хлорели. Сушені, ліофілізовані або іммобілізовані клітини хлорели формують у вигляді гранул, порошків або гелевих матриць, які вносять у ґрунт або воду. Іммобілізація підвищує стійкість клітин до несприятливих умов. Цей метод може бути використаний для біоремедіації ґрунтів, де гранули або порошок змішують з верхнім шаром ґрунту для видалення важких металів і органічних забруднювачів. Дослідження [15] показали, що біопрепарати на основі *Chlorella vulgaris* підвищують біологічну активність ґрунту на 25 % і видаляють до 70 % кадмію за 30 днів. Також цей метод можна використати для очищення водойм, де іммобілізовані клітини хлорели додають у забруднені водойми для поглинання поживних речовин і токсинів. Дослідження [14] продемонструвало 85 % видалення фосфатів з водойм за допомогою іммобілізованої хлорели.

Метод зручний щодо зберігання і транспортування, має тривалий термін дії та стійкість до зовнішніх впливів. Проте він вимагає більших витрат на підготовку біопрепаратів та повільніше вивільняє активні клітини.

3. Використання фотобіореакторів для попереднього культивування та внесення. Хлорелу вирощують у фотобіореакторах [1] для отримання високої концентрації біомаси, яку потім вносять у об'єкти довкілля у вигляді суспензії або концентрованої біомаси. Метод може застосовуватися для вловлювання CO_2 , де біореактори встановлюють на промислових об'єктах для уловлювання CO_2 із димових газів. Отриману біомасу можна використовувати для подальшої переробки або внесення в ґрунт. У дослідженні [16] повідомили про 95 % ефективність уловлювання CO_2 у трубчастих фотобіореакторах із *Chlorella vulgaris*. Також цей метод можна використати для очищення стічних вод, де біомасу з біореакторів додають у системи очищення стоків для видалення поживних речовин і токсинів. У дослідженні [17] показали, що біомаса *Chlorella sorokiniana* знижує вміст амонію в стічних водах на 90 % за 5 днів.

Метод має високу продуктивність, контрольовані умови, а також можливість масштабування, проте вимагає високі капітальні та експлуатаційні витрати і потребує спеціалізованого обладнання.

4. Інтеграція з іншими біологічними агентами (синергетичні методи). Хлорелу вносять у комбінації з іншими мікроорганізмами (наприклад, бактеріями чи грибами) або рослинами для посилення ефекту біоремедіації. Цей метод передбачає внесення суспензії або біопрепаратів із сумішшю організмів. Можна застосовувати для біоремедіації ґрунтів, де комбінацію хлорели з вуглеводне окислювальними бактеріями (наприклад, *Pseudomonas spp.*) підвищує ефективність деградації нафтопродуктів. У дослідженні [18] повідомили про 92 % видалення нафтопродуктів з ґрунту за 20 днів за спільного використання *Chlorella vulgaris* і бактерій. Також цей метод можна використати для фіторемедіації, де хлорелу вносять у ризосферу рослин для стимуляції їхнього росту та поглинання забруднювачів. [19] показали, що внесення хлорели в ґрунт з рослинами кукурудзи підвищує видалення цинку на 30 %.

Метод має синергетичний ефект, який підвищує ефективність очищення та надає підтримку ґрунтовій мікробіоті, проте він складний у підборі сумісних організмів для чого потрібно проводити додаткові дослідження для оптимізації.

5. Пряме вирощування хлорели в об'єктах довкілля. Хлорелу культивують безпосередньо в забруднених водоймах або відкритих ставках, розташованих на забруднених територіях, використовуючи природні або штучні джерела поживних речовин (наприклад, стічні води). Метод можна використати для очищення водойм і стічних вод, де хлорелу вводять у забруднені озера, ставки або канали для поглинання поживних речовин і токсинів. Дослідження [20] показало, що *Chlorella*

rupeoidosa знижує концентрацію нітратів і фосфатів у водоймах на 70...80 % за 10 днів. Також метод можна використати для відновлення деградованих земель, де хлорелу вирощують у відкритих водоймах на забруднених ділянках, а отриману біомасу вносять у ґрунт для покращення його структури та біологічної активності. Він має досить низькі витрати, можливість використання природних ресурсів, проте є ризик контамінації іншими мікроорганізмами та залежність від кліматичних умов.

6. Використання генетично модифікованих штамів хлорели (ГМШХ) [1]. ГМШХ з підвищеною стійкістю до токсинів або поліпшеною здатністю до поглинання забруднювачів вносять у вигляді суспензій або біопрепаратів. Метод має високу ефективність через попередню адаптацію хлорели до специфічних умов. Проте нові штами хлорели можуть нести екологічні ризики, пов'язані з випуском ГМО та мають високі витрати на розробку.

Біологічне очищення стічних вод за допомогою хлорели

Результати багатьох досліджень свідчать, що хлорела здатна ефективно поглинати азотні та фосфорні сполуки зі стічних вод, що є особливо важливим у запобіганні евтрофікації водойм [21]. Завдяки високій швидкості фотосинтезу хлорела сприяє насиченню середовища киснем, що підтримує аеробні процеси біодеградації. Зростання антропогенного навантаження на водні ресурси, пов'язане з розвитком промисловості, сільського господарства та урбанізації, призводить до постійного збільшення об'ємів стічних вод. Традиційні методи очищення потребують великих енерговитрат, а іноді не здатні повністю видалити біогенні елементи, мікрозабруднювачі та важкі метали. При цьому в останні роки науковці активно вивчають використання мікроводоростей, зокрема хлорели, як альтернативного або додаткового біологічного методу очищення стічних вод.

Основними механізми, за допомогою яких хлорела очищує стічну воду, є:

1. Асиміляція азоту та фосфору з неорганічних сполук (NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-});
2. Адсорбція важких металів (Cd, Pb, Zn, Cr) на клітинну оболонку [22];

3. Фотосинтетична оксигенація, що підвищує вміст розчиненого кисню у воді, сприяючи аеробним процесам. На відміну від синьо-зелених водоростей хлорела не посилює процес евтрофікації, а навпаки — є антагоністом;

4. Видалення органічних речовин шляхом утворення біомаси [23]. Накопичена біомаса хлорели є харчовою базою для риб. Проте у випадку очищення вод зі значним вмістом важких металів, використовувати хлорелу як харчову базу для риб неможливо, оскільки важкі метали будуть концентруватися в організмі риб та передаватися по харчовому ланцюгу людині.

Використання хлорели для біологічного очищення вод має такі переваги:

1. Висока ефективність за низьких концентрацій забруднювачів, що особливо добре підходить для водних об'єктів;
2. Можливість комбінованого очищення (органіка, азот, фосфор, важкі метали);
3. Низька вартість методу;
4. Вторинне використання отриманої біомаси (на біопаливо, корми, добрива).

Хлорелу можна застосовувати для різних типів стічних вод. Це можуть бути промислові стоки з харчової та текстильної промисловості. За дослідженнями [24] підтверджена ефективність хлорели для зменшення ХСК та БПК. В комунальних стоках хлорела активно видаляє залишки амонію та фосфатів. В агропромислових стоках Хлорела показала здатність ефективно засвоювати залишки пестицидів і гербіцидів [25].

Для залучення хлорели в природні екосистеми є певні обмеження та недоліки, зокрема необхідність підтримувати та контролювати розвиток хлорели в об'єктах довкілля. У відкритих басейнах-лагунах чи ставках це робити простіше, але розвиток залежить від клімату. Замкнені фотобіореактори мають контрольованіші умови тому їхня ефективність вища, проте і витрати більші. Гібридні системи з аеротенками або біофільтрами дозволяють продукувати хлорелу в великих об'ємах та якісно очищати воду, проте потребують витрат на роботу компресорів аеротенків. Оскільки хлорела залежна від температури та освітлення, то можливість використовувати хлорелу в природних водоймах існує тільки у літній період, хоча певна ефективність є і у весняно-осінній період.

Видалення важких металів за допомогою хлорели

Згідно з роботами [19], хлорела має здатність до біосорбції таких важких металів, як кадмій, свинець, мідь, цинк. Механізм сорбції базується на наявності функціональних груп у клітинній стінці,

які утворюють комплекси з металами. Це відкриває перспективи використання хлорели для очищення шахтних вод, промислових та міських стоків, а також інфільтрату сміттєзвалищ.

Забруднення природних вод важкими металами — одна з найгостріших проблем сучасних еко-технологій. Джерелами такого забруднення є гірничодобувна, металургійна, хімічна промисловість, а також сільське господарство і комунальний сектор. Хімічні методи очищення є ефективними, проте вартісним та не завжди екологічно безпечними. Тому зростає інтерес до біосорбційних методів, зокрема до використання хлорели — прісноводної зеленої мікроводорості, яка здатна акумулювати й видаляти важкі метали з водного середовища. Принцип дії зниження токсичності важких металів оснований на переведенні катіонів важких металів у нерозчинні солі або комплекси, які значно менш токсичні та утримуються в довікллі протягом тривалого часу. Саме такі хімічні реакції відбуваються в клітині хлорели.

Згідно з дослідженнями [26], хлорела діє за кількома механізмами:

1. Біосорбція — метали зв'язуються з функціональними групами (карбоксильними, аміногрупами) клітинної стінки;
2. Біоаккумуляція — іони металів транспортуються всередину клітини;
3. Комплексоутворення — утворення стійких металорганічних комплексів на поверхні клітини.

Ці процеси не вимагають енергетичних витрат і можуть відбуватись як за живих, так і за інактивованих клітин.

Різні метали видаляються хлорелою з різною ефективністю. Приклади досліджень ефективності видалення наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Ефективність видалення важких металів з розчинів за допомогою хлорели

Метал	Ефективність видалення металу	Література
Кадмій (Cd)	Клітини <i>Chlorella vulgaris</i> здатні сорбувати до 90 % іонів кадмію за концентрації 5 мг/л протягом 24 годин	[27]
Свинець (Pb)	<i>Chlorella</i> здатна видаляти до 95 % свинцю у лабораторних умовах за рН 5—6	[28]
Мідь (Cu), Цинк (Zn), Нікель (Ni)	Хлорела найефективніша у видаленні Cu (85 %), Zn (72 %) та Ni (66 %) з модельних водних розчинів. Водночас, конкурентне середовище (присутність інших катіонів) може знижувати ефективність сорбції	[2], [3], [25]

Обмеженнями використання хлорели для сорбції металів є рН середовища, температура, концентрація металу та базові показники її життєдіяльності (освітленість, вміст поживних речовин та ін.). Оптимальний діапазон рН для біосорбції більшості металів — 5,0...7,0. За низького рН відбувається конкуренція між H^+ і іонами металів за активні центри. Підвищення температури покращує сорбцію до певної межі (до 35...37 °C), після чого клітини можуть пошкоджуватись. Концентрація металу у розчині теж впливає на межу насичення біомаси, де з досягненням певного значення ефективність знижується.

Для видалення важких металів за допомогою хлорели можуть використовуватись форми суспензії живої або висушеної біомаси, іммобілізовані системи (біомаса у матриці — гелі, полімери), інтеграції в біореактори або очисні каскади разом з іншими мікроводоростями.

Метод вилучення важких металів з водних розчинів має як переваги, так і недоліки. Перевагами є низька вартість та простота культивування, екологічність, можливість регенерації, селективність сорбції. Недоліками є чутливість до змін рН, температури, необхідність утилізації забрудненої біомаси, неможливість використання забрудненої хлорели в якості кормів для риб.

З погляду економічної ефективності хлорела — це дешевша альтернатива іонообмінним смолам та мембранним технологіям. За оцінками [29], вартість очищення 1 м³ води за допомогою біомаси хлорели може бути в 2—3 рази нижчою, ніж за традиційних фізико-хімічних методів. Особливо це актуально для очищення забруднених ґрунтових або дренажних вод в зонах техногенного навантаження.

Використання хлорели для видалення важких металів із природних вод — перспективна, ефективна та екологічно безпечна технологія. Вона забезпечує високу ефективність видалення таких металів, як кадмій, свинець, мідь за відносно низьких витрат. Проте широке впровадження потребує подальшого дослідження впливу багатоконпонентних середовищ, стабільності сорбції та утилізації насиченої біомаси.

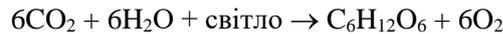
Вловлювання вуглекислого газу та зменшення парникового ефекту

Фотосинтетична активність хлорели дозволяє використовувати її як біологічний фільтр для вловлювання вуглекислого газу з промислових викидів. Дані свідчать про те [4], що 1 тонна біомаси

хлорели здатна поглинути до 1,8 т CO₂ (за сезон), що робить її ефективним інструментом біологічної декарбонізації.

Вуглекислий газ (CO₂) є основним парниковим газом, який спричиняє глобальне потепління та зміну клімату. Зростання концентрації CO₂ у атмосфері, яка досягла 427 ppm у 2024 році порівняно з 280 ppm до промислової революції, вимагає ефективних методів його уловлювання та зменшення. Одним із перспективних біологічних підходів є використання мікрободоростей, зокрема хлорели, завдяки їхній здатності до фотосинтезу, швидкому росту та високій ефективності поглинання CO₂.

Хлорела, як одноклітинна зелена мікрободорість, ефективно поглинає CO₂ через фотосинтез, перетворюючи його на біомасу та кисень. У процесі фотосинтезу CO₂ фіксується в органічні сполуки, такі як вуглеводи, ліпіди та білки за класичною реакцією фотосинтезу:



Дослідження доводять, що хлорела може поглинати CO₂ з концентрацією від 0,04 % (атмосферний рівень) до 20 % (промислові викиди), через що вона придатна для уловлювання CO₂ із димових газів. Наприклад, дослідження [17] демонструє, що *Chlorella vulgaris* може фіксувати до 0,6...1,2 г CO₂ на літр культури за добу за оптимальних умов.

Хлорела демонструє високу ефективність у вловлюванні CO₂ порівняно з наземними рослинами. За даними [14], мікрободорості, зокрема *Chlorella*, можуть фіксувати CO₂ у 10...50 разів ефективніше, ніж дерева, завдяки швидкому росту та високій щільності біомаси. Одне з досліджень [14] показало, що біореактор з *Chlorella pyrenoidosa* здатний уловлювати до 90 % CO₂ із газової суміші за концентрації 10 % CO₂.

Використання хлорели також сприяє зменшенню парникового ефекту через:

1. Секвестрацію вуглецю, де біомаса хлорели може бути використана для виробництва біопалива, біопластику або добрив, що утримує вуглець у стабільних формах.

2. Зменшення викидів за допомогою інтеграції систем вирощування хлорели з промисловими об'єктами (наприклад, електростанціями) дозволяє уловлювати CO₂ безпосередньо з димових газів, знижуючи викиди в атмосферу.

3. Виробництво кисню за допомогою виділення значної кількості O₂, що сприяє підвищенню якості повітря.

Культивування хлорели для таких цілей можливе через відкриті ставки, фотобіореактори та гібридні системи. Інноваційні підходи також включають генетичну модифікацію хлорели для пришвидшення фотосинтезу та підвищення стійкості до високих концентрацій CO₂ [1].

Незважаючи на потенціал, використання хлорели має низку недоліків:

1. Високі витрати вирощування хлорели у фотобіореакторах вимагають значних інвестицій у обладнання, енергію та поживні речовини.

2. Перехід від лабораторних до промислових масштабів ускладнений через потребу в стабільних умовах культивування.

3. Відкриті системи схильні до контамінації іншими мікроорганізмами, що знижує їхню продуктивність.

4. Великі обсяги біомаси потребують ефективних методів переробки, щоб уникнути вторинних викидів CO₂. Утворену біомасу можна використати з користю, наприклад для потреб енергетики, але звичайне вивезення на полігони призведе до повторного потрапляння вуглецю в атмосферу.

Водночас хлорела є перспективним інструментом для вловлювання CO₂ і зменшення парникового ефекту завдяки високій ефективності фотосинтезу, швидкому росту та адаптивності до різних умов. Сучасні технології, такі як фотобіореактори та генетична модифікація, значно підвищують її потенціал. Проте економічні та технічні виклики, такі як висока вартість і складність масштабування, потребують подальших досліджень. Інтеграція систем вирощування хлорели з промисловими процесами та використання біомаси для створення цінних продуктів можуть зробити цей підхід економічно вигідним і екологічно стійким (табл. 2, 3).

Найраціональнішим і економічно доцільнішим методом є очищення стічних вод хлорелою, особливо для муніципальних і промислових об'єктів. Інші методи можуть бути ефективними у комбінації або в спеціалізованих умовах (наприклад, біосорбція у хімічній промисловості чи виробництво біопалива на біофермах).

Таблиця 2

Переваги та недоліки найвідоміших методів використання хлорели

Метод використання хлорели	Переваги	Недоліки	Економічна доцільність
Очищення стічних вод	видаляє органічні речовини, азот, фосфор, важкі метали; насичує воду киснем; низька вартість культивування	необхідна стабільна освітленість; вплив сезонних факторів	висока: може знизити витрати на традиційні очисні технології та утилізацію відходів
Видалення вуглекислого газу з атмосфери	поглинає CO ₂ через фотосинтез; стимулює біомасоутворення	низька швидкість поглинання за низького рівня світла або CO ₂ ; потрібна велика площа культивування	середня: перспективна для великих підприємств або парникових господарств
Біоремедіація ґрунтів	поглинає важкі метали з ґрунту; поліпшує мікробіологічний склад	ефективна лише у верхніх шарах ґрунту; повільна дія	середня: потребує тривалого часу, але менш затратна ніж фізико-хімічні методи
Фітоекстракція у водно-болотних угіддях	ефективна в умовах природних водойм; сприяє біорізноманіттю	складно контролювати процес; погано працює у холодному кліматі	низька: екологічна, але малоприсадна для промислового масштабу
Виробництво біопалива з біомаси хлорели	стала сировина; використовується вторинна біомаса	висока вартість добування ліпідів; потрібне складне обладнання	низька-середня: економічно доцільна лише у масштабованому виробництві
Поглинання важких металів у рідких середовищах (біосорбція)	висока сорбційна здатність; екологічна безпека	не всі метали поглинаються однаково; біомаса вимагає утилізації	висока: вигідно як доповнення до інших методів очищення
Використання в біофільтрах та біореакторах	відносно легке впровадження в наявні системи; автоматизований процес	висока вартість встановлення; потреба у контролі параметрів (рН, O ₂ , t°)	середня-висока: окупається за тривалої експлуатації

Таблиця 3

Переваги та недоліки найвідоміших методів культивування хлорели для природоочищення

Тип обладнання	Призначення	Основні характеристики	Переваги	Недоліки
Фотобіореактор (замкнений)	культивування хлорели в контрольованих умовах для біоочищення стічних вод або отримання біомаси	об'єм: 100...10 000 л; освітлення штучне або природне; матеріал — скло, пластик; температурний контроль	висока продуктивність; захист від забруднення; можливість автоматизації	висока вартість; складність обслуговування
Відкритий фотобасейн	масове вирощування хлорели для біологічного очищення вод або отримання біомаси	глибина: 15...30 см; освітлення природне; потрібна велика площа; перемішування лопатевими мішалками	низька собівартість; простота у будівництві та експлуатації	низька чистота культури; залежність від погодних умов
Мікробіологічні біофільтри з хлорелою	біофільтрація забруднених стоків та вод з використанням фіксованої біомаси хлорели	компактність; можливість модульної установки; потужність — 1...10 м ³ /год	висока ефективність видалення забруднень; невеликі габарити	необхідна періодична заміна біомаси; обмежена потужність
Біоочисні споруди з аеробною секцією на основі хлорели	видалення органічних сполук, азоту, фосфору у стічних водах	комбінована система; відстійники, аератори та фотобіореактори	комплексне очищення; виробництво біомаси як вторинного продукту	високі експлуатаційні витрати; складне проектування
Мобільна установка очищення води на основі мікродоростей	очищення забрудненої води в польових умовах або у зонах аварій	потужність до 5 м ³ /добу; живлення автономне (генератор, сонячні панелі); режим роботи — автоматичний	мобільність; застосування в умовах надзвичайних ситуацій	невисока продуктивність; залежність від умов освітлення
Інтегровані модулі біоремедіації ґрунтів (зрошення суспензією хлорели)	внесення хлорели в ґрунт для біодеструкції пестицидів і важких металів	обприскувачі, ємності для розчину; система контролю вологості	дешева реалізація; підвищення біологічної активності ґрунтів	залежність від клімату; потрібна тривала дія

Для промислового очищення води найефективнішими є закриті фотобіореактори, натомість відкриті басейни — доступне рішення для фермерських господарств. В екстрених ситуаціях доцільні мобільні установки.

Еколого-економічні розрахунки використання хлорели в природоохоронних технологіях

Розрахунки собівартості базуються на даних урахуванням витрат на культивування, сушіння, переробку та екологічної вигоди. Ці розрахунки не є точними, оскільки немає детальної статистики таких процесів та невідомо багато змінних складових, таких як: обсяги виробництва (лабораторний чи промисловий), тип реактора (відкриті ставки чи закриті фото-біореактори), джерело поживних речовин (стічні води чи синтетичні) та регіональні факторів (наявність дешевої енергії, води та ін). Екологічні аспекти враховуються через вигоди, такі як вартість уникненого забруднення (наприклад, \$50...100 за тону CO₂ за глобальними оцінками) або заощадження на традиційних методах очищення (\$0,5...2 за м³ стічних вод).

Розрахунки проводяться за такими припущеннями та значеннями:

- продуктивність *Chlorella*: 0,5...2 г/л/добу біомаси у відкритих реакторах та 2...5 г/л/добу в закритих реакторах;
- фіксація CO₂ ~1,8 кг CO₂ на кг біомаси;
- вміст ліпідів для біопалива: 20...40 % від біомаси;
- валюта — USD (оцінка в гривнях за динамічного курсу долара в Україні недоцільна);
- екологічна вигода розрахована як собівартість (витрати мінус заощадження від екологічних ефектів, наприклад, кредитів на CO₂ або заміни хімічних добрив).

1. *Метод очищення стічних вод.* Хлорела видаляє нітрати, фосфати та важкі метали зі стічних вод, виробляючи біомасу, яку можна використовувати як біодобриво або корм. Екологічна вигода: зменшення евтрофікації (вартість уникненого забруднення ~\$10...50 за кг видалених нітратів) та заощадження на традиційних методах очищення (~\$0,5...2 за м³ води).

Ключові витрати методу:

- капітальні витрати у 25...50 разів вищі для закритих реакторів порівняно з відкритими;
- операційні. Енергія — 0,5...5 кВт·год/кг біомаси, вода, сушіння — \$46...110 за тону сухої біомаси);
- собівартість біомаси \$0,55...10 за кг (знижується до \$0,73 за кг у разі використання монохроматичного світла та стічних вод як поживних речовин).

Розрахунок собівартості на м³ очищеної води:

- припустимо, що 1 м³ стічних вод виробляє ~0,1...0,5 кг біомаси (видаляє ~50...90 % нітратів/фосфатів);
- витрати на культивування становитимуть \$1...5 за кг біомаси;
- загальну собівартість розрахуємо за формулою:

$$(\text{витрати на кг біомаси} \cdot \text{кг біомаси на м}^3) + \text{фіксовані витрати (енергія} \sim \$0,1...0,5 \text{ за м}^3)$$

за середньої продуктивності виробництва 0,3 кг біомаси/м³ стічних вод;

– середня витрата становить \$3 за кг біомаси.

Тоді розрахуємо базову собівартість $3 \cdot 0,3 = \$0,9$ за м³ стічних вод.

Врахуємо вартість сушіння (10 % від витрат) = +\$0,1 (за \$50/тону = \$0,05/кг · 0,3 кг).

Тоді розрахуємо екологічну вигоду

(заощадження на традиційному очищенні \$1 за м³) = чиста собівартість \$0,9 – \$1 = –\$0,1 (прибуток).

Еколого-економічна оцінка: нетто вигода \$0,1...1 за м³ завдяки продажу біомаси як добрива (~\$0,5 за кг). Дані подано в табл. 4.

Таблиця 4

Еколого-економічна ефективність використання методу очищення стічних вод

Параметр	Діапазон витрат (USD)	Екологічна вигода (USD)	Чиста собівартість за одиницю (USD)
За кг біомаси	0,55...10	0,5...2 (від продажу)	0,05...8
За м ³ води	0,2...2	0,5...2 (забруднення уникнули)	–0,3...1,5

Отримання біомаси зі стічних вод може бути економічно виправданим, проте отримана таким методом біомаса може бути використана як азот- та фосфорвмісне добриво з урахуванням певних додаткових стадій оброблення хлорели, що збільшить операційні витрати і зробить процес малопродуктивним. На відміну від методу активного мулу, біомасу хлорели не можна використовувати для сильно забруднених стічних вод, що накладає обмеження на метод. Проте, за певних умов, еколого-економічна доцільність можлива, наприклад для очищення відкритих водойм.

2. Метод поглинання та секвестрація CO₂

Хлорела фіксує CO₂ з промислових газів (наприклад, з ТЕС), виробляючи біомасу. Можлива екологічна вигода такого методу — це зменшення викидів (вартість вуглецевого податку ~\$15...30 за тону CO₂ в США та до \$100...150 у ЄС). В Україні вартість складає 30 грн/т (~\$0,7, станом на 2025 рік), причому на перші 500 тонн податок не сплачується. Через це еколого-економічна доцільність методу поглинання вуглекислого газу в Україні абсолютно відсутня. Подальші розрахунки наведені для ринку ЄС, де найвищі екологічні податки за викиди CO₂.

Ключові витрати методу:

- операційні витрати енергії для культивування — \$4,75...6,55 за кг хлорели.
- собівартість секвестрації за тону CO₂ — \$702...1585 (включає культивування, збирання).
- використання стічних вод знижує витрати на ~10 % (заощадження води ~60 %).
- енергія 48...65 кВт·год/кг ліпідів (з CO₂ фіксацією ~0,454 кг CO₂/кг біомаси, але типово — 1,8 кг CO₂/кг).

Розрахунок собівартості на тону CO₂:

за обґрунтованого припущення, що 1 кг біомаси фіксує в середньому 1,8 кг CO₂, маємо:

Витрати на біомасу: \$2...15 за кг (відкритим методом).

Тоді розрахуємо необхідну кількість біомаси на тону CO₂ = 1000 кг CO₂/1,8 = ~556 кг біомаси, а також витрати на фіксацію тонни CO₂ = 556 · середня \$8 за кг = \$4448.

Варто також додати вартість сушіння/переробки (~20 % = \$890).

Відтак, загальні витрати становлять \$5338 за тону CO₂.

В результаті порохуємо екологічну вигоду

(плата за викиди вуглекислого газу для ЄС \$50...100/тону) = чиста \$5338 – \$75 (середнє) = –\$5263.

Еколого-економічна оцінка: за максимальної для ЄС вартості плати за викиди \$100...150/тону, нетто витрати на уловлювання однієї тонни вуглекислого газу становлять \$600...5200. Дані подано в табл. 5.

Таблиця 5

Еколого-економічна ефективність використання методу поглинання та секвестрація CO₂ за допомогою хлорели

Параметр	Діапазон витрат (USD)	Екологічна вигода (USD)	Чиста собівартість
За тону CO ₂	750...5200	50...100 (плата за викиди)	600...1550
За кг біомаси	2...15	1...5 (від CO ₂ фіксації)	1...10

Очевидно, такі високі вартості вловлювання вуглекислого газу та виробництва біомаси не допускають прибутків, через що метод недоцільний з економічного погляду.

3. Метод виробництва біопалива.

Хлорела виробляє ліпіди для біодизелю з такими екологічними вигодами: заміна викопного палива (зменшення CO₂ на ~70 ... 90 %), очищення стічних та забруднених вод. Можлива екологічна вигода складає \$0,5...1 за літр у випадку субсидій на зелене паливо. В Україні таких субсидій нема, проте є в Німеччині, Франції, Австрії, США, Бразилії, Індонезії, Аргентині та ін.

Ключові витрати:

- капітальні витрати становлять \$3,5...6,5 млн за технологічну лінію;
- операційні витрати \$837...1132 за кг ліпідів;
- собівартість біомаси становить \$2...15 за кг (відкритим методом), \$32 за кг (у закритих ємностях);
- вартість сушіння становить \$46...110 за тону.

Розрахунок собівартості на кг біодизелю. Припустимо, що 1 кг біомаси дає 0,3 кг ліпідів (близько 0,25 кг біодизелю), тоді:

- витрати на виробництво біомаси хлорели становлять \$5...20 за кг;
- необхідні ліпіди на кг біодизелю становлять 1/0,8 (ефективність конверсії) = 1,25 кг ліпідів;
- необхідна біомаса хлорели на кг біодизелю становить 1,25 / 0,3 = ~4,17 кг;
- витрати = 4,17 · \$10 (середнє) = \$41,7;
- врахуємо додаткові витрати на трансестерифікацію

(~\$5...10) + сушіння (\$0,05/кг · 4,17 = \$0,2).

Відтак загальна витрата на виробництво біодизелю становить \$47...52 за кг (близько \$50...60 за

літр, залежно від щільності), а еколого-економічна витрата (з врахуванням субсидій ~\$1 за літр) = чиста \$50...60 за літр.

Еколого-економічна оцінка: нетто вигода у разі масштабування завдяки заміщенню палива та CO₂ кредитами відсутня, але для зниження високих витрати варто інтегрувати методи вловлювання вуглекислого газу та виробництва добрив. Дані подано в табл. 6.

Таблиця 6

Еколого-економічна ефективність використання методу виробництва біопалива

Параметр	Діапазон витрат (USD)	Екологічна вигода (USD)	Чиста собівартість
За кг біомаси	2...32	1...5 (від продажу палива)	1...27
За кг біодизелю	40...100	10...30 (субсидії/CO ₂)	10...90

Підсумовуючи, можна констатувати, що собівартість виробництва біодизелю цим методом становить \$50...60 за літр, що вкрай дорого, через що цей метод наразі недоцільний. В перспективі зі зменшенням світових запасів нафти, збільшенням вартості енергоресурсів, з розвитком методу виробництва хлорели чи створенням нових ефективніших штамів хлорели доцільність такого методу може зрости.

Висновки

Використання штаму мікродорості *Chlorella vulgaris* Polikarp відкриває широкі перспективи для охорони довкілля завдяки її унікальним біологічним властивостям. Ця мікродорість ефективно поглинає вуглекислий газ, сприяє очищенню стічних вод від забруднювачів, таких як важкі метали, нітрати та фосфати, а також може бути використана для виробництва біопалива та інших екологічно чистих продуктів. Застосування *Chlorella vulgaris* Polikarp у біотехнологічних процесах дозволяє не лише зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, а й сприяти сталому розвитку шляхом створення замкнених циклів переробки відходів. Подальші дослідження та впровадження технологій на основі цього штаму можуть значно посилити ефективність екологічних ініціатив, забезпечуючи баланс між економічними вигодами та збереженням природних ресурсів.

Хоча в науковій літературі широко представлені дослідження хлорели, проте переконливих прикладів впровадження та використання цієї технології вкрай мало, а економічно прибуткових технологій майже немає. Способом зробити економічно доцільним використання хлорели може бути зниження промислових викидів вуглекислого газу для підприємств, які платять значні кошти податку на викиди. Також має економічну доцільність метод зниження вмісту фосфатів та азоту у природних водах зі значним ступенем забруднення, а також біосорбція катіонів металів.

Найдешевший метод використання хлорели — це очищення стічних вод (\$0,2...2 за м³), з потенційним прибутком завдяки біопродуктам. Вловлювання викидів CO₂ і секвестрація коштує \$700...1600 за тону, через що метод є недоцільним. Метод отримання біопалива за допомогою хлорели має також високу собівартість \$40...100 за кг, що теж економічно недоцільно. Можливий подальший пошук шляхів зменшення собівартості методів використання хлорели шляхом інтеграції і об'єднання отримання біомаси для виробництва енергоресурсів та отримання добрив і одночасним вловлюванням вуглекислого газу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] O. Ulytsky, and L. Pashkevich, "Use of *Chlorella vulgaris* Polikarp microalgae strain for purification of freshwaters from technological pollution," *Ecological Sciences*, no. 6 (51), pp. 58-67, 2023, <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.9>.
- [2] 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. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9860-6_16.
- [3] 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. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1799-2>.
- [4] M. Anjos, B. D. Fernandes, A. A. Vicente, J. A. Teixeira, and G. Dragone, "Optimization of CO₂ bio-mitigation by *Chlorella vulgaris*," *Bioresource Technology*, vol. 139, pp. 149-154, Jul. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.032>.
- [5] Y. Fang, Y. Cai, Q. Zhang, R. Ruan, and T. Zhou, "Research status and prospects for bioactive compounds of *Chlorella* species: composition, extraction, production, and biosynthesis pathways," *Process Safety and Environmental Protection*, Aug. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.08.114>.
- [6] Sumarni Hamid Aly, N. I. ElBanna, and Mohammad Hossein Fathi, "Chlorella in aquaculture: challenges, opportunities, and disease prevention for sustainable development," *Aquaculture International*, vol. 32, Aug. 2023. <https://doi.org/10.1007/s10499-023-01229-x>.

- [7] R. Singh, R. Birru, and G. Sibi, "Nutrient Removal Efficiencies of *Chlorella vulgaris* from Urban Wastewater for Reduced Eutrophication," *Journal of Environmental Protection*, vol. 08, no. 01, pp. 1-11, 2017. <https://doi.org/10.4236/jep.2017.81001>.
- [8] S. S. Bulynina, E. E. Ziganshina, and A. M. Ziganshin, "Growth Efficiency of *Chlorella sorokiniana* in Synthetic Media and Unsterilized Domestic Wastewater," *Biotech*, vol. 12, no. 3, pp. 53-53, Aug. 2023. <https://doi.org/10.3390/biotech12030053>.
- [9] Z. Wang, et al., "Sulfate induced surface modification of *Chlorella* for enhanced mercury immobilization," *Journal of environmental chemical engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 108156-108156, Jun. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108156>.
- [10] S. R. Subashchandrabose, K. Venkateswarlu, K. Venkidusamy, T. Palanisami, R. Naidu, and M. Megharaj, "Bioremediation of soil long-term contaminated with PAHs by algal-bacterial synergy of *Chlorella* sp. MM3 and *Rhodococcus wratislaviensis* strain 9 in slurry phase," *Science of The Total Environment*, vol. 659, pp. 724-731, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.453>.
- [11] E. Kyraztopoulou, N. Kyzaki, L. Malletzidou, E. Nerantzis, and N. A. Kazakis, "The Efficiency of *Chlorella vulgaris* in Heavy Metal Removal: A Comparative Study of Mono- and Multi-Component Metal Systems," *Clean Technologies*, vol. 7, no. 2, p. 35, Apr. 2025. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7020035>.
- [12] Miguel A. Vale, António Ferreira, José C.M. Pires, Ana L. Gonçalves, *CO₂ capture using microalgae*, Woodhead Publishing, 2020, pp. 381-405. ISBN 9780128196571. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00017-7>.
- [13] V. Grishko, V. Zotsenko, N. Bogatko, and D. Ostrovskiy, "Biological features, biotechnology, cultivation and areas of stagnation of microscopic single-cell algae of the genus *Chlorella*: (review of the literature)," *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*, vol. 26, no. 101, pp. 329-340, Sep. 2024. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-a10150>.
- [14] L. Wang, et al., "Cultivation of *Chlorella vulgaris* in sludge extracts: Nutrient removal and algal utilization," *Bioresource Technology*, vol. 280, pp. 505-510, May 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.017>.
- [15] V. Kirsanova, "The expediency of cultivating and using microalgae (*Chlorella*) as organic fertilizers," *Ecological Sciences*, no. 1(28), pp. 324-327, Jan. 2020. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.1-28.52>.
- [16] A. M. Miranda, F. Hernandez-Tenorio, D. Ocampo, G. J. Vargas, and A. A. Sáez, "Trends on CO₂ Capture with Microalgae: A Bibliometric Analysis," *Molecules*, vol. 27, no. 15, p. 4669, Jul. 2022. <https://doi.org/10.3390/molecules27154669>.
- [17] K. Kumar, S. K. Mishra, G.-G. Choi, and J.-W. Yang, "CO₂ Sequestration Through Algal Biomass Production," Springer eBooks, pp. 35-57, Jan. 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22813-6_2.
- [18] V. R. V. Ashwani, M. Perumalsamy, and S. Pandian, "Enhancing the synergistic interaction of microalgae and bacteria for the reduction of organic compounds in petroleum refinery effluent," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 19, pp. 100926, Aug. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100926>.
- [19] X. Li, et al., "Nutrient removal from swine wastewater with growing microalgae at various zinc concentrations," vol. 46, pp. 101804-101804, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101804>.
- [20] J. K.C.A, M. Z. Alam, M. W. A., K. B. Y., A. J., and A. T. Hossain, "Removal of Nitrate and Phosphate from Municipal Wastewater Sludge by *Chlorella Vulgaris*, *Spirulina platensis* and *Scenedesmus quadricauda*," *IJUM Engineering Journal*, vol. 12, no. 4, Jan. 1970. <https://doi.org/10.31436/ijumej.v12i4.214>.
- [21] R. Singh, R. Birru, and G. Sibi, "Nutrient Removal Efficiencies of *Chlorella vulgaris* from Urban Wastewater for Reduced Eutrophication," *Journal of Environmental Protection*, vol. 08, no. 01, pp. 1-11, 2017. <https://doi.org/10.4236/jep.2017.81001>.
- [22] O. Spain, M. Plöhn, and C. Funk, "The cell wall of green microalgae and its role in heavy metal removal," *Physiologia Plantarum*, vol. 173, no. 2, pp. 526-535, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1111/ppl.13405>.
- [23] Ю. А. Баландюх, «Утилізація надлишкової біомаси гідробіонтів в технологіях біологічного очищення поверхневих вод.» дис. канд. техн. наук, 21.06.01. Львів, 2021. 136 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://lpnu.ua/sites/default/files/2021/dissertation/11683/disbalandyukhyuriyfin.pdf>.
- [24] M. F. Soto, C. A. Diaz, A. M. Zapata, and J. C. Higuaita, "BOD and COD removal in vinasses from sugarcane alcoholic distillation by *Chlorella vulgaris*: Environmental evaluation," *Biochemical Engineering Journal*, vol. 176, pp. 108191, Sep. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108191>.
- [25] 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. <https://doi.org/10.4172/2471-2728.1000177>.
- [26] M. H. Keshavarz, Z. Shirazi, and P. Eskandari, "A simple assessment of toxicity towards *Chlorella vulgaris* of organic aromatic compounds in environmental protection," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 163, pp. 669-678, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.074>.
- [27] 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152488>.
- [28] 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. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23485>.
- [29] F. Ricceri, M. Malaguti, C. Derossi, M. Zanetti, V. Riggio, and A. Tiraferri, "Microalgae biomass concentration and reuse of water as new cultivation medium using ceramic membrane filtration," *Chemosphere*, vol. 307, p. 135724, Nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135724>.

Рекомендована кафедрою екології, хімії та технологій захисту довкілля ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 18.08.2025

Петрук Роман Васильович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: rrgoma07@gmail.com ;

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

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

R. V. Petruk¹
L. P. Pashkevych¹

Environmental and Economic Analysis of Environmental Protection Technologies Using of Microalga Strain *Chlorella Vulgaris Polikarp* Utilization

¹Vinnytsia National Technical University

*The article is devoted to the study of the potential of chlorella (*Chlorella Vulgaris Polikarp* strain) as a universal tool for solving the environmental problems in Ukraine, in particular in the context of soil bioremediation, wastewater treatment and carbon dioxide (CO₂) capture. The article analyzes modern technologies, using *Chlorella* to solve environmental challenges. In particular, the application of photobioreactors for cultivating chlorella under controlled conditions, biological preparations based on this microalga for restoring degraded soils, as well as systems for treating industrial and municipal wastewater are considered. Separately, local studies in Ukraine are highlighted, demonstrating the effectiveness of chlorella in reducing the content of petroleum products, phenols and heavy metals in soils contaminated by military operations, as well as its use in biotechnological processes for capturing CO₂ at industrial facilities, which contributes to reducing the greenhouse effect. The article emphasizes the strategic role of chlorella in restoring the ecosystems of Ukraine, especially in regions affected by anthropogenic impact and military operations. The use of chlorella can not only contribute to environmental purification, but also provide economic benefits as a result of creation new biotechnological products. In the context of global environmental challenges, such as climate change and degradation of natural resources, chlorella is considered a key element in achieving sustainable development in Ukraine. The article emphasizes the need for further research and government support for scaling up these technologies, as well as their integration into national environmental policy. The article presents the first detailed study of the ecological and economic feasibility of using the microalgae strain *Chlorella Vulgaris Polikarp* to solve environmental problems in Ukraine, in particular in the context of soil bioremediation, wastewater treatment, and carbon dioxide (CO₂) capture. It was found that at the current stage, it is economically feasible to use chlorella to reduce the content of heavy metals in natural waters.*

Keywords: environmental safety, environmental protection technologies, *Chlorella Vulgaris Polikarp*, *Chlorella*, heavy metal ions.

Petruk Roman V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: prroma07@gmail.com ;

Pashkevych Leonid P. — Post-Graduate Student of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: leonid@nd.ua