

УДК 628\*35:582

<https://doi.org/10.31713/vs4202510>

**Клименко М. О.** [1; ORCID ID: 0000-0003-0892-0648],

д.с.-г.н., професор,

**Степаненко М. А.** [1; ORCID ID: 0009-0007-1113-8450],

здобувач третього рівня вищої освіти

<sup>1</sup>Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

## ВИКОРИСТАННЯ ХЛОРЕЛИ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ ТА ПОКРАЩЕННЯ ЇХ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ

У статті узагальнено сучасні наукові дані щодо застосування мікроводоростей роду *Chlorella* як ефективного біотехнологічного інструмента для очищення різних типів водних об'єктів (комунальні, агропромислові та промислові стоки, малі річки і ставки) та одночасного відновлення їх екологічного стану. На підставі критичного огляду рецензованих джерел (інтервал 2018–2025 рр.) проаналізовано основні механізми фітореMediaції – асиміляцію розчинних форм азоту й фосфору, біосорбцію і біоаккумуляцію важких металів, адсорбцію та біотрансформацію фармацевтичних мікрозабруднювачів – а також фактори, що визначають ефективність цих процесів (температура, освітленість, C:N:P, HRT, режим газопостачання). Узагальнено діапазони ефективності видалення основних класів забруднювачів: загального азоту (TN) – орієнтовно 50–93%, загального фосфору (TP) – 60–97%, COD/BOD – 50–85% (варіювання залежно від конфігурації систем і умов експерименту). Окремо розглянуто придатність відкритих (HRAP, ставки) та закритих (фотобіореактори – PBR) технологічних схем, їхні переваги і обмеження для помірного клімату, а також інноваційні підходи (імобілізація, біофлокуляція, мікро-/нанопухирці, консорціальні культури), що підвищують продуктивність і полегшують збір біомаси. Проаналізовано ризики, пов'язані з накопиченням токсичних речовин у біомасі (важкі метали, залишкові фармакологічні сполуки), і запропоновано алгоритм безпечного поводження: моніторинг (ICP-MS, LC-MS/MS), критерії селекції для подальшого використання біомаси (агропродукція, переробка, енергетична утилізація). Стаття містить практичні рекомендації для адаптації технологій *Chlorella* до українських умов: застосування гібридних схем (PBR для холодного періоду + HRAP для теплої пори), відбір локальних штамів з підвищеною толерантністю, розробка пілотних програм з чіткими метриками ефективності (TN, TP, COD, енерговитрати на 1 м<sup>3</sup>). Наведено перелік пріоритетів для подальших досліджень: стандартизація протоколів, табличний синтез результатів,

попередній ТЕА/LCA, довготривалі польові експерименти у помірному кліматі. Практичне значення роботи полягає в інтегрованому підході – поєднанні біологічного очищення з управлінськими, технічними і нормативними заходами, що дозволяє підвищити ймовірність успішного впровадження фітореMediaції на основі *Chlorella* в умовах України.

**Ключові слова:** *Chlorella* spp.; фітореMediaція; очищення води; евтрофікація; фотобіореактор; біосорбція; важкі метали; антибіотики; біомаса; водні екосистеми.

**Постановка проблеми.** Забруднення поверхневих і підземних вод є однією з ключових екологічних загроз ХХІ століття, що прямо впливає на якість питної води, біорізноманіття водних екосистем і стійкість економічних галузей, пов'язаних з водними ресурсами. Інтенсивна урбанізація, нерегульовані скиди господарсько-побутових та промислових стічних вод, інтенсивне застосування мінеральних добрив і пестицидів у сільському господарстві спричиняють надходження у водні об'єкти надмірних кількостей азоту й фосфору, органічних забруднень, важких металів і фармацевтичних мікрозабруднювачів (зокрема антибіотиків) [2; 9]. Це призводить до евтрофікації, масових «цвітінь» водоростей, дефіциту розчинного кисню, деградації водних біоценозів і зниження екосистемних послуг водойм.

В Україні ситуація ускладнюється нерівномірною інфраструктурою очисних споруд, застарілими технологіями на окремих підприємствах та сезонними навантаженнями на малі річки та озера, особливо у зонах інтенсивного сільськогосподарського використання. Часті випадки неповного або неякісного очищення стоків сприяють накопиченню забруднювачів у донних відкладеннях і біологічних ланцюгах, що створює довготривалі екологічні та санітарно-гігієнічні ризики. Одночасно існує потреба в технологіях очищення, які були б екологічно безпечними, енергоефективними, економічно життєздатними та адаптованими до кліматичних і організаційно-економічних умов України [12].

Сучасні хімічно-реагентні методи очищення, хоча й ефективні для певних класів забруднень, супроводжуються високими експлуатаційними витратами, утворенням вторинних побічних продуктів та складнощами щодо утилізації концентратів, тому особливо актуальним є розвиток біотехнологічних підходів, зокрема фітореMediaції за участі мікрководоростей, які поєднують очищення

води з відновленням екологічного статусу водойм і виробництвом цінної біомаси [4; 9].

Мікрододорості роду *Chlorella* привертають увагу як перспективний агент фітореMediaції через характерні біологічні риси: швидкий темп росту, високу продуктивність фотосинтезу, здатність інтенсивно засвоювати розчинені форми азоту та фосфору, а також зв'язувати (через біосорбцію чи біоаккумуляцію) іони важких металів та деякі органічні контамінанти [1; 5]. Однак для практичного впровадження таких підходів необхідно вирішити набір прикладних завдань: оптимізувати умови культивування для місцевих кліматичних режимів, визначити кінетику видалення різних класів забруднювачів у реальних стічних водах, розробити ефективні методи збору та безпечного використання/утилізації вилученої біомаси та адаптувати технологічні рішення до існуючої інфраструктури очисних споруд [12].

Отже, існує науково-практична потреба в систематичному дослідженні потенціалу *Chlorella* spp. для очищення водних об'єктів в умовах, наближених до українських, з урахуванням сучасних технологічних інструментів (фотобіореактори, іммобілізація, системи мікро-/нанопухирців, біофлокуляція, консорціальні підходи) та вимог щодо безпечного поводження з отриманою біомасою [9; 11]. Цей розділ визначає основу для подальшої постановки мети і завдань дослідження, спрямованих на розроблення практично застосовних рішень з очищення вод і відновлення екологічного стану водойм.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Огляд актуальних досліджень показує, що протягом останніх років наукова спільнота значно розширила експериментальні й оглядові напрацювання щодо застосування *Chlorella* spp. як ефективного біотехнологічного інструмента для очищення різних класів водних стоків. Лабораторні і пілотні дослідження підтверджують стабільну здатність культур *Chlorella* знижувати концентрації біогенних елементів: у численних роботах повідомляють про видалення загального азоту у межах приблизно 70–90% і загального фосфору до 85–97% за періоди культивування від 7 до 21 дня [1; 2; 3]. Одночасно відзначено помітне зниження органічного навантаження (COD/BOD) – типово 50–85% залежно від типу стоків і режимів культивування [1; 4]. Додавання CO<sub>2</sub>, оптимізація освітлення та контроль режимів аерації суттєво підвищують продуктивність культури й швидкість очищення [1; 2].

Окремий напрям досліджень стосується елімінації фармацевтичних мікрозабруднювачів і антибіотиків: результати

виявилися гетерогенними і залежними від класу сполуки, початкових концентрацій та стану клітин; так, деякі антибіотики (наприклад, тетрацикліни) ефективно видаляються або метаболізуються хлорелою, тоді як інші сполуки потребують модифікацій системи (іммобілізація, застосування мікро/нанопухирців) для отримання значущих показників елімінації [7; 8]. Щодо важких металів, *Chlorella vulgaris* демонструє високу біосорбційну й біоаккумуляційну здатність до іонів Pb, Cd, Cu, Zn, Ni тощо – у моноелементних експериментах видалення може сягати 65–99%, у мультиелементних системах ефективність зазвичай знижується через конкурентні взаємодії й можливу металеву токсичність, що впливає на ріст і фотосинтетичну активність водорості [5; 6].

Технологічно дослідження розмежовують відкриті системи (HRAP, ставки) і закриті фотобіореактори: перші дешевші у будівництві і простіші у масштабуванні, проте чутливі до кліматичних умов, контамінації та сезонності; другі дають кращий контроль параметрів і вищу продуктивність, але є капіталомісткими [2; 4]. Інноваційні підходи – іммобілізація на матрицях, біофлокуляція (зокрема за участі грибних пелет *Aspergillus* для ініціації флокуляції), застосування мікро-/нанопухирців і посилена аерація – показали, що їхнє поєднання може значно полегшити збір біомаси, підвищити ефективність видалення забруднювачів і зменшити енергетичні витрати на операції відокремлення [2; 9]. Дослідження ролі консорціумів (мікрowodорості + бактерії, «фікосфера») підкреслюють синергічний ефект: бактерії доповнюють шляхи деградації органіки й підвищують стабільність системи, що сприяє більш повному очищенню реальних стічних вод [3; 10].

Разом з тим у доступній літературі виявлені ключові обмеження і прогалини: значна варіативність експериментальних протоколів (різні початкові концентрації забруднювачів, тривалість експериментів, режими освітлення і подачі CO<sub>2</sub>) ускладнює порівняння й масштабування результатів; сезонність та помірний клімат знижують продуктивність відкритих систем у регіонах типу України, що вимагає адаптації (теплиці, сезонне планування) [12]; накопичення токсичних речовин у біомасі ставить питання безпечної утилізації або перед-переробки для використання в якості добрив/кормів [11]. Крім того, бракує довготривалих польових і верифікаційних пілотних дослідів у помірному кліматі та економічних оцінок життєвого циклу технологій для прийняття обґрунтованих інвестиційних рішень [9].

На підставі огляду цих джерел можна зробити висновок, що *Chlorella* spp. має реальний потенціал для інтеграції в системи очищення водойм і стічних вод за умови адаптації технологій до місцевих умов, стандартизації протоколів досліджень та розробки методик безпечного поводження з отриманою біомасою; пріоритетними напрямками подальших робіт є випробування локальних штамів у реальних стоках, оптимізація режимів культивування для помірного клімату, тестування комбінованих технологічних ланцюжків (консорціуми + іммобілізація + мікро/нанопухирці) та проведення економіко-екологічних оцінок для практичної імплементації в українських умовах [11].

**Мета, завдання та методики проведення досліджень.** Метою дослідження є комплексне узагальнення та систематизація сучасних наукових даних щодо застосування мікроводорості *Chlorella* spp. для очищення водних об'єктів і покращення їх екологічного стану з акцентом на адаптацію технологічних рішень до умов помірного клімату України.

Для досягнення цієї мети поставлено низку взаємопов'язаних завдань: систематичний огляд публікацій з відбором матеріалів, релевантних практичному застосуванню *Chlorella* у очистці стоків і водних екосистем; виділення та порівняння основних механізмів фітореMediaції (поглинання біогенів, біосорбція/біоаккумуляція важких металів, біодеградація органічних і фармацевтичних контамінантів) [1; 6; 7]; аналіз технологічних конфігурацій (відкриті HRAP/ставки, закриті фотобіореактори, іммобілізація, біофлокуляція, консорціальні підходи та інновації – мікро/нанопухирці, інтенсивна аерація) з точки зору ефективності, стійкості й можливості інтеграції в існуючу інфраструктуру очисних споруд [4; 10]; оцінка переваг і обмежень згаданих підходів у контексті сезонності, енергетичних і трудових витрат, а також безпеки подальшого використання отриманої біомаси [11; 12]; формування практичних рекомендацій для пілотних впроваджень і розробки методичних вказівок для українських умов. Оскільки в межах цієї роботи не передбачено проведення власних лабораторно-експериментальних дослідів, основні висновки та рекомендації сформовані на підставі критичного синтезу опублікованих даних, їхньої порівняльної інтерпретації та оцінки придатності для практичного впровадження в українських реаліях, з пропозиціями щодо пріоритетних напрямів для майбутніх пілотних випробувань і деталізованих техніко-економічних досліджень.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Збільшена увага до застосування мікроводоростей роду *Chlorella* обумовлена тим, що вони поєднують фотосинтетичне фіксування  $\text{CO}_2$  з поглинанням поживних речовин, що робить їх ефективним інструментом очищення вод. На відміну від класичних технологій, фіторемедіація з використанням *Chlorella* не тільки видаляє N, P, органічні забруднювачі, важкі метали та мікрополіруючі агенти зі стоків, а й продукує біомасу з цінними метаболітами [4; 9]. Одночасно *Chlorella* асимілює великі об'єми  $\text{CO}_2$ , що сприяє зменшенню викидів парникових газів під час очистки стічних і поверхневих вод [1]. Це поєднання екологічних і економічних переваг робить застосування *Chlorella* актуальним для сталих технологій водопідготовки.

**Механізми видалення забруднень.** *Chlorella* активно поглинає азотні та фосфорні сполуки: амонійний/нітратний азот і фосфати використовуються для біосинтезу білків, нуклеїнових кислот і клітинних структур. Дослідження показують, що *C. vulgaris* може видаляти ~90–95% амонійного та нітратного азоту й фосфору зі стічних вод; зокрема отримано до ~93% видалення  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  і 89%  $\text{PO}_4^{3--}\text{P}$  за 3 дні культивування [1]. Органічні забруднення (хімічне/біохімічне споживання кисню) також значно зменшуються: наприклад, спільне вирощування *Chlorella* забезпечило ~84% зниження COD разом із 95% видалення амонію та 97% фосфору протягом 5 діб [3]. Важкі метали поглинаються на поверхні клітин хлорели через взаємодію з функціональними групами стінки (карбоксили, аміно- і гідроксильні групи) [6]. Експериментально показано, що *C. vulgaris* видаляє 65–99% таких металів (Ni, Pb, Zn, Cd, Cu) за 3–7 діб культивування [5]. Фармацевтичні контамінанти (наприклад, антибіотики, гормони, НПЗП) частково видаляються комбінацією сорбції на клітинах і мікробної/алгальної трансформації. Так, хлорели демонстрували практично повне вилучення сульфаметоксазолу (до 99,3%) та ципрофлоксацину (100%) під час культивування [13], а інноваційна система з іммобілізованими клітинами і мікро-/нано-пухирцями забезпечувала понад 90% усунення хлорамфеніколу [8]. Таким чином, *Chlorella* поєднує фотосинтез з біологічним накопиченням і перетворенням широкого спектра забруднень, що робить її перспективним біоагентом для очищення вод.

**Технологічні конфігурації.** Системи вирощування *Chlorella* для очищення вод поділяються на відкриті (басейни, ставки, HRAP) і закриті (фотобіореактори) конструкції. Відкриті ставки та

високопродуктивні ставкові реактори (HRAP) є дешевшими у спорудженні і простими в масштабуванні, оскільки використовують природне освітлення та добре підходять для теплого клімату. Такі системи довели свою ефективність у певних роботах, проте вони чутливі до погодних умов, контамінації чужорідними видами й значних втрат води через випаровування [2; 9]. У закритих фотобіореакторах (наприклад, трубчастих або мембранних) параметри (освітленість, температура, газовий режим) контролюють спеціально, що підвищує стабільність процесу і концентрацію культури. Так, у мембранному фотобіореакторі з *C. vulgaris* отримано 93% видалення амонію та 89% фосфору при гідравлічному часі 3 доби [2]. Водночас закриті системи потребують вищих початкових інвестицій та витрат електроенергії (освітлення, перемішування, підігрів) і мають складнішу процедуру відділення біомаси від води [4]. Для наочного порівняння переваг і недоліків відкритих і закритих систем доцільно надати узагальнені показники в таблиці.

Таблиця

Порівняльна характеристика систем культивування *Chlorella* для водоочищення

Характеристика	Відкриті системи (HRAP, Ставки)	Закриті фотобіореактори (PBR)
Капітальні витрати (CAPEX)	Низькі	Високі (матеріали, датчики, насоси)
Експлуатаційні витрати (OPEX)	Помірні (перемішування)	Високі (освітлення, термостатування)
Контроль параметрів	Низький (залежність від погоди)	Високий (повний контроль pH, T, світла)
Ризик контамінації	Високий (інші водорості, хижачи)	Низький (монокультура)
Втрати води	Значні (випаровування)	Мінімальні (замкнений цикл)
Продуктивність біомаси	Низька/Середня	Висока
Придатність для України	Сезонна (весна-осінь)	Цілорічна (при розміщенні у приміщенні/теплиці)

**Інноваційні підходи.** Сучасні дослідження фокусуються на підвищенні продуктивності й зручності систем. Імобілізація клітин *Chlorella* в полімерних матрицях або гелевих намистинах спрощує

рециркуляцію культури й покращує стабільність. Наприклад, поєднання іммобілізації *C. vulgaris* у гелевих намистинах з подачею мікро- та нанопухирців суттєво підвищувало перенесення кисню до клітин, що збільшувало їхню активність і видалення лікарських забрудників (сульфадіазину та хлорамфеніколу на 79,9% і 93,9% відповідно) [2]. Біофлокуляція шляхом додавання філаментозних грибів (наприклад, *Aspergillus niger*) або колоніальних водоростей дає можливість агломерувати клітини *Chlorella* у великі згустки. Оптимізовані грибні пелети (5–28 мм) забезпечували 100% флокуляцію *C. vulgaris* і водночас ~92% видалення амонію та фосфору у двоступеневому процесі з питомою подачею біотовару [2; 4]. Крім того, створюються консорціуми мікробіотворостей і бактерій (або грибів) – змішані культури дають синергетичний ефект: наприклад, тристороння система *Chlorella*–бактерії досягла ~93,7% видалення загального азоту та 93,6% фосфору [3; 10]. Як показано в оглядах, такі мікс-культури вирощуються з вищим накопиченням біомаси і кращим видаленням поживних речовин порівняно з монокультурами. Усі ці інтегровані конфігурації демонструють значні переваги і перспективи для покращеного очищення вод [4].

**Міжнародний досвід та адаптація до клімату України.** Подібні технології успішно впроваджують у різних кліматичних зонах. Наприклад, у країнах Близького Сходу показано, що *Chlorella vulgaris* може видаляти майже 95% амонійного азоту й 97% фосфору з побутових стоків за 5 днів культивування [2]. В південній Європі проводили пілотні дослідження зимового культивування автохтонних штамів: у Італії взимку при середніх температурах  $\approx 10^\circ \text{C}$  експеримент виявив значне зниження N та P у відстійниках води до нормативних значень, а також майже повне видалення кишкових паличок за кілька днів обробки [14]. Ці результати підкреслюють, що в помірному кліматі України потрібно обирати місцеві (морозостійкі) штами і налаштовувати параметри реактора (оптимальне гідравлічне навантаження, аерацію), аби забезпечити ефективність, порівнянну з експериментами в теплих регіонах [12].

**Екологічні обмеження, безпека біомаси та масштабування.** При всій перспективності *Chlorella*-систем необхідно враховувати обмеження. Великі відкриті ставки потребують чималої площі і можуть сприяти неконтрольованому розповсюдженню культури у навколишнє середовище; тому рекомендується використовувати автохтонні види й запобіжні заходи біобезпеки [12]. Безпека утвореної

біомаси є особливо важливою: адсорбовані на водоростях важкі метали та органічні контамінанти накопичуються в їх тканинах, що ускладнює подальше використання біомаси (наприклад, у харчових цілях) без додаткової очистки [11]. До того ж застосування хімічних флокулянтів може призвести до засмічення біомаси токсичними залишками. Збирання великої маси клітин також залишається технічно складним: традиційні методи (центрифугування, фільтрація) енерговитратні і дорогі. Однак оцінки показали, що у порівнянні з традиційними підходами мікрководорості здатні суттєво знизити загальне енергоспоживання системи очищення води [9]. Отже, *Chlorella*-реактори мають високий потенціал для масштабування, але потребують оптимізації (в умовах України, особливо щодо сезонності, освітлення та аерації) і ретельного контролю та утилізації побічної біомаси.

**Висновки.** У роботі показано, що *Chlorella* spp. є перспективним і багатофункціональним агентом для очищення водних об'єктів завдяки синергії фотосинтетичної продуктивності, здатності до інтенсивної асиміляції біогенів та здатності сорбувати і частково трансформувати широкий спектр контамінантів. Літературні дані свідчать про значну варіабельність ефективності залежно від технологічної конфігурації і експлуатаційних умов: закриті фотобіореактори забезпечують більш стабільні і високі показники видалення при кращому контролі параметрів, тоді як відкриті НРАР є дешевшою, але сезонно залежною альтернативою. Інноваційні підходи – іммобілізація, біофлокуляція, застосування мікро/нанопухирців та використання консорціумів – підвищують продуктивність і зменшують енерговитрати на сепарацію, однак потребують додаткової валідації в польових умовах та оцінки життєвого циклу. Ключовим обмеженням є ризик накопичення токсичних речовин у біомасі, що визначає необхідність обов'язкового моніторингу й розробки чітких алгоритмів поводження з біомасою. Для адаптації технологій *Chlorella* до умов України доцільно впроваджувати гібридні пілотні установки, відбирати локальні штами з підвищеною толерантністю та виконувати попередній ТЕА/LCA. Майбутні дослідження мають бути спрямовані на стандартизацію експериментальних протоколів, довготривалу польову перевірку ефективності підходів у помірному кліматі та розробку нормативних вимог щодо безпечного використання отриманої біомаси. Поєднання біологічних технологій з комплексними управлінськими та

регуляторними заходами створює оптимальні передумови для сталого впровадження фітореMediaції на основі *Chlorella* як частини національної стратегії збереження і відновлення водних екосистем.

1. Kong W., Kong J., Ma J. et al. *Chlorella vulgaris* cultivation in simulated wastewater for biomass production, nutrient removal and CO<sub>2</sub> fixation simultaneously. *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 284. P. 112070. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112070>.
2. Alazaiza M. Y. D., He S., Su D. et al. Sewage water treatment using *Chlorella vulgaris* for simultaneous nutrient separation and biomass production. *Separations*. 2023. Vol. 10(4). P. 229. URL: <https://doi.org/10.3390/separations10040229>.
3. Oruganti R. K., Katam K., Show P. L., Gadhamshetty V., Upadhyayula V. K. K. A comprehensive review on the use of algal-bacterial systems for wastewater treatment with emphasis on nutrient and micropollutant removal. *Environmental Technology Reviews*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2056823>.
4. Goh P. S., Lau W. J., Ismail A. F. et al. Microalgae-enabled wastewater remediation and nutrient recovery through membrane photobioreactors: recent achievements and future perspective. *Membranes*. 2022. Vol. 12(11). P. 1094. URL: <https://doi.org/10.3390/membranes12111094>.
5. Kyraztopoulou E., Kyzaki N. et al. The efficiency of *Chlorella vulgaris* in heavy metal removal: a comparative study of mono- and multi-component metal systems. *Clean Technologies*. 2025. Vol. 7(2). P. 35. URL: <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7020035>.
6. Mahlangu D., Mphahlele K., De Paola F., Mthombeni N. H. Microalgae-mediated biosorption for effective heavy metals removal from wastewater: a review. *Water*. 2024. Vol. 16(5). P. 718. URL: <https://doi.org/10.3390/w16050718>.
7. Escapa C., Coimbra R. N., Paniagua S., García A.I., Otero M. Nutrients and pharmaceuticals removal from wastewater by culture and harvesting of *Chlorella sorokiniana*. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 185. P. 175–181. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.004>.
8. Chu Y., Wang X., Liu Z. et al. New insight into the concentration-dependent removal of multiple antibiotics by *Chlorella sorokiniana*. *Bioresource Technology*. 2023. Vol. 385. P. 129409. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129409>.
9. Abuhaseesh Y., Ghazal A. et al. Advances in *Chlorella* microalgae for sustainable wastewater treatment and bioproduction. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2025. Vol. 22. P. 100715. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.100715>.
10. Wirth R., Pap B., Böjti T. et al. *Chlorella vulgaris* and its phycosphere: understanding the bacterium-microalga interaction. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020. Vol. 8. P. 557572. URL: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.557572>.
11. Akca M. O., Saygin S. D., Bilgin A. et al. Harnessing *Chlorella vulgaris* for mucilage mitigation and wheat growth on fluvisol. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02559-w>.
12. Le T. A. T., Nguyen T. D. Potential of hospital wastewater treatment using locally isolated *Chlorella* sp. LH2 from cocoon wastewater. *Bioresources and Bioprocessing*. 2024. Vol. 11. P. 35. URL: <https://doi.org/10.1186/s40643-024-00748-6>.
13. Xiong Q., Liu Y.-S., Hu L.-X., Shi Z.-Q., Cai W.-W., He L.-Y., & Ying G.-G. Co-metabolism of sulfamethoxazole by a freshwater microalga *Chlorella pyrenoidosa*. *Water Research*. 2020. Vol. 175. P. 115656. URL: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115656>.
14. Benà E. et al. Winter Season Outdoor Cultivation of an Autochthonous *Chlorella*-

Strain in a Pilot-Scale Prototype for Urban Wastewater Treatment. *Water*. 2024. Vol. 16, Issue 18. P. 2635. URL: <https://doi.org/10.3390/w16182635>.

## REFERENCES:

1. Kong W., Kong J., Ma J. et al. *Chlorella vulgaris* cultivation in simulated wastewater for biomass production, nutrient removal and CO<sub>2</sub> fixation simultaneously. *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 284. P. 112070. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112070>.
2. Alazaiza M. Y. D., He S., Su D. et al. Sewage water treatment using *Chlorella vulgaris* for simultaneous nutrient separation and biomass production. *Separations*. 2023. Vol. 10(4). P. 229. URL: <https://doi.org/10.3390/separations10040229>.
3. Oruganti R. K., Katam K., Show P. L., Gadhamshetty V., Upadhyayula V. K. K. A comprehensive review on the use of algal-bacterial systems for wastewater treatment with emphasis on nutrient and micropollutant removal. *Environmental Technology Reviews*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2056823>.
4. Goh P. S., Lau W. J., Ismail A. F. et al. Microalgae-enabled wastewater remediation and nutrient recovery through membrane photobioreactors: recent achievements and future perspective. *Membranes*. 2022. Vol. 12(11). P. 1094. URL: <https://doi.org/10.3390/membranes12111094>.
5. Kyratzopoulou E., Kyzaki N. et al. The efficiency of *Chlorella vulgaris* in heavy metal removal: a comparative study of mono- and multi-component metal systems. *Clean Technologies*. 2025. Vol. 7(2). P. 35. URL: <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7020035>.
6. Mahlangu D., Mphahlele K., De Paola F., Mthombeni N. H. Microalgae-mediated biosorption for effective heavy metals removal from wastewater: a review. *Water*. 2024. Vol. 16(5). P. 718. URL: <https://doi.org/10.3390/w16050718>.
7. Escapa C., Coimbra R. N., Paniagua S., García A.I., Otero M. Nutrients and pharmaceuticals removal from wastewater by culture and harvesting of *Chlorella sorokiniana*. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 185. P. 175–181. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.004>.
8. Chu Y., Wang X., Liu Z. et al. New insight into the concentration-dependent removal of multiple antibiotics by *Chlorella sorokiniana*. *Bioresource Technology*. 2023. Vol. 385. P. 129409. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129409>.
9. Abuhasheesh Y., Ghazal A. et al. Advances in *Chlorella* microalgae for sustainable wastewater treatment and bioproduction. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2025. Vol. 22. P. 100715. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.100715>.
10. Wirth R., Pap B., Böjti T. et al. *Chlorella vulgaris* and its phycosphere: understanding the bacterium-microalga interaction. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020. Vol. 8. P. 557572. URL: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.557572>.
11. Akca M. O., Saygin S. D., Bilgin A. et al. Harnessing *Chlorella vulgaris* for mucilage mitigation and wheat growth on fluvisol. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02559-w>.
12. Le T. A. T., Nguyen T. D. Potential of hospital wastewater treatment using locally isolated *Chlorella* sp. LH2 from cocoon wastewater. *Bioresources and Bioprocessing*. 2024. Vol. 11. P. 35. URL: <https://doi.org/10.1186/s40643-024-00748-6>.
13. Xiong Q., Liu Y.-S., Hu L.-X., Shi Z.-Q., Cai W.-W., He L.-Y., & Ying G.-G. Co-metabolism of sulfamethoxazole by a freshwater microalga *Chlorella pyrenoidosa*. *Water Research*. 2020. Vol. 175. P. 115656. URL: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115656>.
14. Benà E. et al. Winter Season Outdoor Cultivation of an Autochthonous *Chlorella*-

**Klymenko M. O.** [1; ORCID ID: 0000-0003-0892-0648],  
Doctor of Agricultural Sciences, Professor,  
**Stepanenko M. A.** [1; ORCID ID: 0009-0007-1113-8450],  
Post-graduate Student

<sup>1</sup>*National University of Water and Environmental Engineering, Rivne*

## **USE OF *CHLORELLA* (*CHLORELLA* SPP.) FOR THE REMEDIATION OF AQUATIC SYSTEMS AND IMPROVEMENT OF THEIR ECOLOGICAL STATUS**

**This article presents a systematic synthesis of contemporary scientific evidence on the use of microalgae of the genus *Chlorella* as an effective biotechnological tool for treating various types of water bodies (municipal, agro-industrial and industrial effluents, small rivers and ponds) and restoring their ecological status. Based on a critical review of peer-reviewed literature (2018–2025), the main mechanisms of phycoremediation are analyzed – assimilation of dissolved nitrogen and phosphorus species, biosorption and bioaccumulation of heavy metals, adsorption and biotransformation of pharmaceutical micropollutants – as well as the environmental and operational drivers of process efficiency (temperature, irradiance, C:N:P ratio, hydraulic retention time, gas supply regime). Consolidated efficacy ranges are reported for key pollutant classes: total nitrogen (TN)  $\approx$  50–93%, total phosphorus (TP)  $\approx$  60–97%, and COD/BOD  $\approx$  50–85%, with variability depending on system configuration and operating conditions. The suitability of open (HRAP, ponds) and closed (photobioreactors – PBR) technological configurations is discussed with respect to temperate climates, alongside innovations (immobilization, bioflocculation, micro/nanobubbles, algal-bacterial consortia) that increase productivity and facilitate biomass recovery. Risks associated with contaminant accumulation in biomass (heavy metals, residual pharmaceuticals) are assessed, and a safe-handling algorithm is proposed, including monitoring by ICP-MS and LC-MS/MS and decision criteria for biomass valorization routes (agronomic use, material or energy recovery). Practical recommendations are provided for adapting *Chlorella* systems to Ukrainian conditions: hybrid schemes (PBR in cold seasons + HRAP in warm seasons), selection of local tolerant strains, and pilot programs with explicit performance metrics (TN, TP, COD, energy consumption per m<sup>3</sup>). Priorities for future research are outlined: standardization of protocols, tabular data**

**synthesis, preliminary TEA/LCA, and long-term field trials in temperate climates. The article's practical value lies in its integrated approach, combining biological remediation with managerial, technical and regulatory measures to enhance the viability of *Chlorella*-based phycoremediation in Ukraine.**

**Keywords:** *Chlorella* spp.; phycoremediation; water treatment; eutrophication; photobioreactor; biosorption; heavy metals; antibiotics; biomass; aquatic ecosystems.

Отримано: 22 жовтня 2025 року  
Прорецензовано: 30 жовтня 2025 року  
Прийнято до друку: 28 листопада 2025 року