Agrarian Bulletin of the Black Sea Littoral. 2026, Issue 120
ISSN2707-1162 (online) ISSN 2707-1154 (print)

УДК: 628.35:582.263:546.3
DOI 10.37000/abbsl.2026.120.25

Юрій Бойко
Кандидат біологічних наук, доцент
Одеський державний аграрний університет
ORCID ID: 0000-0002-3387-0219
e-mail: yuriyalexb@gmail.com

Ірина Бойко
Кандидат хімічних наук, доцент
Одеський національний медичний університет
ORCID ID: 0000-0002-3101-8540
e-mail: i.boyko.od@gmail.com

ОЧИСТКА СТІЧНИХ ВОД ВІД ВАЖКИХ МЕТАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КУЛЬТУРИ *CHLORELLA VULGARIS*

Анотація

Не зважаючи на велику кількість існуючих технологій очистки стічних вод (промислових, меліораційних, побутових), кінцевий хімічних склад стоків, що надходить до природних водоймищ може становити загрозу для їх екологічного стану. Ціллю роботи було дослідження використання мікрокультури Chlorella vulgaris для очищення стічних вод від розчинних форм важких металів. Культуру Chlorella vulgaris вирощували у скляних біореакторах на поживному середовищі Тамія. Режим освітлення постійний, штучний. Барбатаж складав: повітря – від 0,05 ppm до 0,1 ppm, вуглекислий газ - від 0,01 ppm до 0,05 ppm. Отриману концентровану культуру вносили до об'єму стічної води у пропорції 1:5, концентрація Chlorella vulgaris у розчині, що вносилися складала 5 х 107 клітин/мл. Отриману суміш витримували протягом 15 діб проводячи вимірювання концентрації міді, цинку, марганцю та хрому на 3, 5, 10 та 15 добу. Було встановлено, що в перші 5 діб відбувається поглинання культурою Chlorella vulgaris більш ніж 50 % від першопочаткової кількості кожного важкого металу. У той же час інтенсивність поглинання залежала від початкової концентрації метала, при її збільшенні до токсичних для Chlorella vulgaris величин, процес поглинання помітно гальмувався. При концентрації цинку 2,5 мг/л, на п'яту добу поглинулося у 1,5 рази менше іонів металу ніж у випадку концентрації 0,9 мг/л. Також був зафіксований ефект повторного підвищення концентрації хрому на п'яту добу, що ми пов'язуємо з механізмами його абсорбції на зовнішню поверхню мембрани Chlorella vulgaris. Проведено дослідження показало, що використання Chlorella vulgaris може стати основою високоефективного біотехнологічного методу очистки стічних вод від важких металів.

Ключові слова: *Chlorella vulgaris, важкі метали, стічні води.*

Вступ. Техногенний тиск на водні екосистеми становить одну з найбільш критичних сучасних екологічних проблем, яка суттєво деструктурує біологічне різноманіття та порушує функціональну стійкість гідробіоценозів. Стандартні очисні споруди зазвичай неспроможні ефективно вилучати мікрозабруднюючі компоненти, представлені розмаїттям хімічно інертних та біологічно активних

речовин (БАР). Серед них виділяють пестициді препарати, фармпрепарати, поверхнево-активні сполуки, поліциклічну ароматику, важкі метали та органічні мікродомішки. Наявність таких речовин згубно позначається на стані гідробіонтів (включаючи риб, зоопланктонні організми та макробезхребетних), руйнуючи трофічні мережі та порушуючи природну рівновагу у водоймах [1-3].

Значні побоювання викликає тривалий період напіврозпаду цих елементів у довкіллі, їхня висока токсичність та виражена здатність до накопичення в організмах, що формує масштабні ризики для екологічного благополуччя та людського здоров'я. Наведені компоненти спроможні провокувати мутагенні ефекти, канцерогенез і порушення ембріонального розвитку [4]. Через природні ліпофільні властивості вони акумулюються переважно у ліпідних депо живих організмів. Для таких токсикантів також властивий ефект біомагніфікації, що виявляється у зростанні їхньої концентрації у вищих трофічних ланцюгах і суттєвому посиленні загального екологічного ризику [5].

Знешкодження агрогенних, комунально-побутових і промислових стоків можливе завдяки впровадженню біотехнологічних методів фіто- та пікоремедіації [6], орієнтованих на залучення мікроорганізмів задля метаболічної деструкції та зв'язування різноманітних токсикантів. Науковий пошук у цьому напрямі інтенсивно триває ще з середини минулого століття [7-9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Будучи ключовими автотрофними продуцентами у гідроекосистемах, мікроводорості не тільки формують первинну біомасу, а й виступають надійними біоіндикаторами екологічного стану середовища, безпосередньо коригуючи його трофічні параметри та гідрохімічний режим. Сьогодні вагома увага науковців прикута до вивчення можливостей мікроводоростей утилізувати надлишок біогенних сполук зі стічних вод із залученням попередніх фізико-хімічних етапів (таких як гравітаційне осадження та декантація рідкої фази), а також вторинної біологічної очистки (включаючи аеробні канальні системи та активний мул). При цьому досягається ефективна фіксація вуглецю разом із вилученням із водного середовища фосфатних, азотистих, металовмісних і складних органічних сполук. Наразі науково підтверджено біоремедіаційний та очисний потенціал приблизно 40 видів водоростей стосовно природних акваторій та побутових стічних вод [10].

Висока адаптивність мікроводоростей до довкілля дозволяє їм результативно знешкоджувати органічні мікрозабрудники у стічних водах незалежно від їхнього походження чи фізико-хімічних умов [11]. До цієї групи полютантів належать залишки ліків, гігієнічні засоби, пестициди, поліхлоровані біфеніли, гормональні препарати й промислові реактиви [12]. Однак зазначені речовини нерідко утримуються у водоймах, накопичуючись у верхній товщі води. Наприклад, культивування *Chlorella sorokiniana* забезпечило вилучення від 60 до 100 % диклофенаку, ібупрофену, парацетамолу та метопрололу. Разом із тим елімінація карбамазепіну й триметоприму виявилася суттєво нижчою –

максимум 30 та 60 % відповідно, що вказує на неоднакову сприйнятливість фармацевтичних субстанцій до біофотохімічної переробки [13]. Міжмолекулярна взаємодія розчинених органічних сполук із мікроводоростевою біомасою здатна модифікувати ферментативну активність клітин, від якої безпосередньо залежать динаміка й повнота розкладу забруднювальних речовин [14].

У біодеструкції макролідних антибіотиків (зокрема еритроміцину та кларитроміцину) вищу ефективність відносно інших видів показує *Chlamydomonas acidophila*, яка здатна очищувати стоки від цих препаратів на 93-65 % та 64-50 % відповідно [15]. Експериментальні спостереження свідчать, що навіть критично високий вміст фармацевтичних сполук не пригнічує життєдіяльність цього штаму, підтверджуючи його перспективність як витривалого біоагента для системи водоочищення [15-17].

Перспективним напрямом є також застосування ціанобактерії *Spirulina platensis* для біоремедіації вод, забруднених лікарськими засобами. Дослідники з'ясували, що додавання 0,3 г/л глюкози в серійних дослідах стимулювало біодеградацію карбамазепіну, підвищивши показник його елімінації з 30 до 50 % [18].

Високий потенціал до кометаболічного перетворення сульфаметоксазолу продемонстрували штами *Pseudokirchneriella subcapitata*, *Scenedesmus quadricauda*, *Sc. obliquus*, *Sc. acuminatus* та *Chlorella pyrenoidosa*, що обґрунтовує доцільність їх введення до біотехнологічних комплексів очищення. Крім того, доведено спроможність мікроводоростей до кометаболічної трансформації сульфаніламіду, що створює підґрунтя для їх впровадження у новітні водоочисні технології [19].

Будучи фундаментальними первинними продуцентами, які закладають основу харчових ланцюгів у водоймах, мікроводорості відіграють критичну роль у збереженні стабільності екосистем. Завдяки здатності абсорбувати токсичні сполуки вони не тільки допомагають самоочищенню водного середовища, а й беруть участь у трофічному перенесенні цих речовин, що суттєво впливає на перерозподіл забруднювачів усередині біоценозу [20]. Чисельні наукові публікації підтверджують факт акумуляції токсичних металів у біомасі гідробіонтів [21]. Зокрема, це доводять дані експериментів [22], згідно з якими мікроводорость *Chlorella vulgaris* за умов впливу металів у концентрації до 1 мг/л кожного виказує виражену біоакумуляційну спроможність, особливо стосовно Zn (0,83 мг/г сухої речовини), Cu (0,67 мг/г) та Mn (0,52 мг/г). Показники накопичення Cr (0,45 мг/г) і Cd (0,38 мг/г) також виявилися високими, тоді як для Pb зафіксовано найменший рівень акумуляції – 0,12 мг/г.

У солоноводних екосистемах мікроводорость *Phaeodactylum tricornutum* спроможна концентрувати Zn, Cu та Cd у обсягах понад 30 мг/кг у донних відкладах, що вказує на її адаптованість до тривалого забруднення та високий потенціал для біомоніторингу морських середовищ [23].

Застосування мікроводоростей для очищення поєднує економічну вигідність із можливістю одночасно вилучати забруднюючі речовини та отримувати цінну біомасу [21].

Метою статті є дослідження здатності культури мікроводорослі Chlorella vulgaris очищувати стічні води від важких металів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для культивування була отримана чиста культура *Chlorella vulgaris* від комерційного виробника ТОВ "Хлорелла Україна", м. Біла Церква, Україна. Культуру *Chlorella vulgaris* вирощували у скляних біореакторах різного об'єму. Температура вирощування жорстко не контролювалась та була близька до температури у приміщенні де відбувалось вирощування і складала 26-29 °С, культивування проводили у літній період. Режим освітлення штучний, за допомогою фітоламп, цілодобовий. Барбатація відбувалась шляхом активного нагнітання атмосферного повітря та вуглекислого газу у товщу поживного середовища. Швидкість надходження атмосферне повітря – від 0,05 ppm до 0,1 ppm, вуглекислий газ - від 0,01 ppm до 0,05 ppm. Для вирощування використовувалась стандартне поживне середовище Тамія.

Після отримання концентрованої культури *Chlorella vulgaris* проводили дослідження її здатності забезпечувати очищення води від різних забруднювачів. Для цього розчин з культурою *Chlorella vulgaris* у концентрації 5 х 10^7 клітин/мл вносили до об'єму стічної води у пропорції 1 : 5. Після цього отриману суміш залишали на термін від 12 годин до 14 діб в залежності від типу забруднювача. Наприкінці вказаного терміну від суміші відбирали пробу води для подальшого кількісного хімічного аналізу з визначенням кінцевої концентрації забруднювача.

Відбір проб проводили червень місяць, 2026 року. Надалі проби води зберігали у холодильнику для подальшого додавання до поживних середовищ де вирощувалась *Chlorella vulgaris*. Точки забору: пляж Отрада, 16 станція Фонтану, Чорноморка.

Хімічні аналізи проб води проводили за допомогою тест-наборів виробника Macherey-Nagel (Germani), Visocolor Chromium (VI) (від 0,01 мг/л), Visocolor Copper (від 0,1 мг/л), Visocolor Zinc (від 0,1 мг/л), Visocolor Manganese (від 0,1 мг/л). Визначення проводили на фотоелектричному аналізаторі води VISOCOLOR PF-12Plus, (Germany).

Хімічний аналіз зразків води відібраних зі стоків морського узбережжя Чорного моря у районі м. Одеса. показав підвищений вміст важких металів, а саме міді (260 мкг/л, 16 станція Фонтана), цинку (2,5 мг/л, Чорноморка), марганцю (0,1-0,24 мг/л, у всіх точках), хрому (80 мкг/л, Чорноморка). У подальшому в зібрані стічні води у нативному вигляді була додана культура *Chlorella vulgaris* з метою зменшення водневої концентрації наведених важких металів. Отримані дані, щодо динаміки зміни концентрації міді у стічних водах після додавання культури *Chlorella vulgaris* надані рис. 1 (A-D).

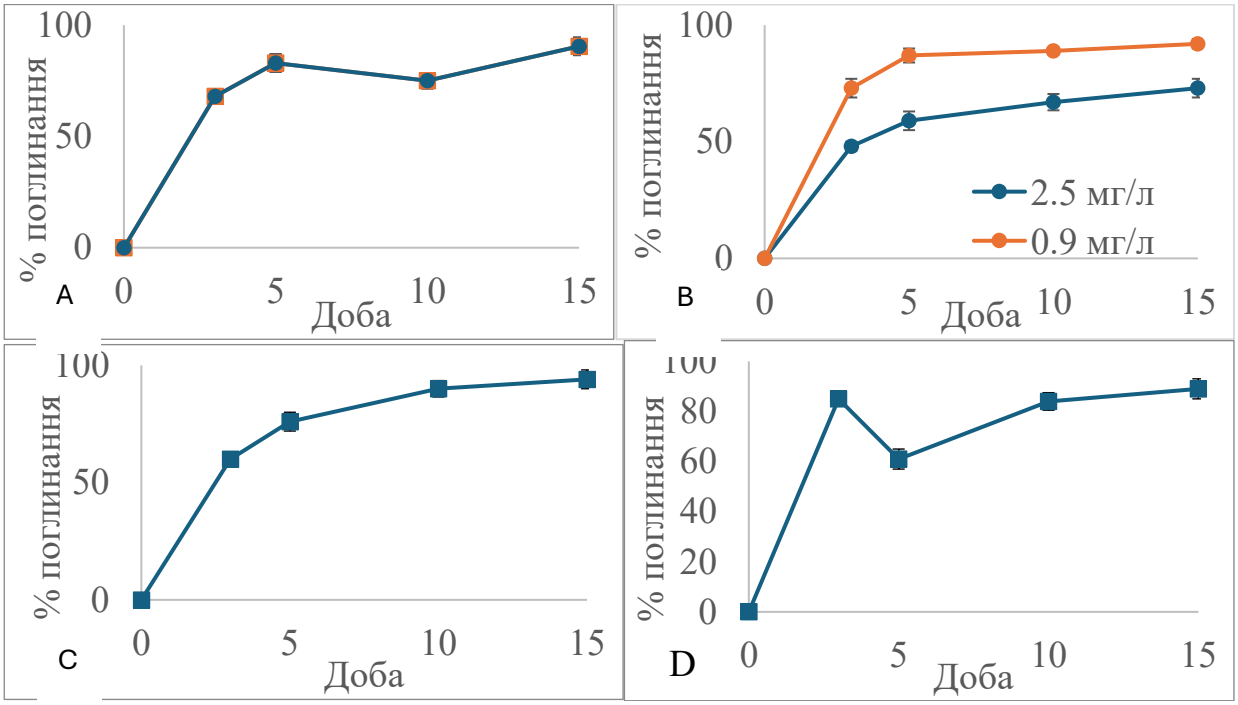


Рис. 1. **Динаміка поглинання важких металів A – міді, B – цинки, C – марганцю, D – хрому культурою *Chlorella vulgaris* після додавання у стічні води, % поглинутого важкого металу від початкової концентрації**

На третій добу культивування *Chlorella vulgaris* поглинає 68 % розчиненої міді, на п'яту добу концентрація міді зменшується до 83 %, але потім знову дещо збільшується на 10 добу (75 %). Найнижча концентрація міді зафіксована на 15 добу – 90,5 % міді абсорбовано.

У випадку цинку при додаванні культури *Chlorella vulgaris* до стічних вод з максимальною концентрацією металу (2500 мкг/л), максимальний рівень відсоток поглинання становив 70. Тому було вирішено провести додаткові дослідження зі зменшеною концентрацією цинку. При додаванні водорості до стічних вод отриманих на 16 ст. Фонтана (концентрація цинку 920 мкг/л), рівень поглинання становив 92 %. Для досягнення практично максимального рівня поглинання було достатньо 5 діб. На відміну від міді для цинку не спостерігалось зворотного підвищення концентрації після перших 5 діб культивації.

Характер динаміки зміни концентрації марганця при додаванні культури *Chlorella vulgaris* подібний до відповідної динаміки для цинку. Вперши п'ять діб відбувається поглинання більшості металу, абсорбується 76 %, після чого швидкість абсорбції помітно знижується і на 15 добу додатково абсорбується ще 18 % марганцю. Хоча по ГДК концентрація марганцю була в 4 рази вище норми (концентрація цинку перевищувала ГДК в 2,4 рази), абсолютні кількості цього металу були невеликі – 0,24 мг/л, що помітно відрізняє його від цинку.

Поглинання хрому культурою *Chlorella vulgaris* мало свої особливості. На третю добу поглиналося 85 % всього хрому з суміші. Після чого, на 5 добу частина хрому зворотно поверталася (кількість поглинутого хрому

зменшувалася до 61 %). Надалі відбувалося повторна реабсорбція і на 15 з суміші видалялось 89 % хрому.

Отримані нами дані підтверджуються здатність *Chlorella vulgaris* ефективно видаляти іони важких металів з стічних вод. Літературними дані також свідчать, що культура *Chlorella vulgaris* здатна зменшувати концентрації таких металів як нікелю, кадмію, кобальту, міді, хрому, свинцю, алюмінію, цинку, ртуті та навіть оксиду урану. Але в тих же дослідженнях згадується, що ефективність абсорбції залежить від ряду факторів: pH середовища, іонної сили розчину, початкової концентрації важкого металу, який абсорбується [24]. Експериментальне використання більш ніж 14 видів різних одноклітинних водоростей показало, що саме *Chlorella vulgaris* є одним з найбільш ефективних абсорбуючих організмів [25]. Первинні механізми пов'язані зі зменшенням концентрації важких металів пов'язані з формування електростатичних взаємодій між металевими іонами та зарядами органічними молекул зовнішньої поверхні мембрани водоростей. Це призводить до абсорбції металів на поверхні клітини переважно на ділянках зв'язування. Слід вказати, що подібний механізм має обмеження пов'язані з кінцевістю розмірів мембрани та вільних місць для зв'язування. Також при загибелі клітини відбувається швидке зворотне надходження металу до водного середовища. Наступним етапом поглинання є проходження металу крізь біологічну мембрану та потрапляння всередину клітини де він може як накопичуватися, біоакумулюватися, так і зазнавати хімічних перетворень внаслідок біотрансформації. Як вже зазначалося одним найголовніших обмежуючих факторів виступає концентрація метала у водному середовищі. При критичних значеннях відбувається переповнення мембранних депо, а внутрішньоклітинний пул металу починає завдавати токсичних ефектів, що призводить до зупинки росту і можливої загибелі мікроорганізму [26].

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведена робота показала, що використання мікрокультури *Chlorella vulgaris* може бути ефективним методом очистки стічних вод від важких металів. Водорость здатна поглинати більшу частину розчинних іонів міді, цинку, хрому та марганцю протягом перших п'яти діб. Здатність до поглинання у значній мірі залежить від початкової концентрації важкого металу. Подальші дослідження використання *Chlorella vulgaris* для очистки стічних вод дозволяє розробити ефективні біотехнологічні методики покращення хімічної якості стоків, що надходять до природних водойм.

Конфлікт інтересів.

Один з авторів є членом редакційної колегії (головний редактор). Він не приймав участь в первинній оцінці щодо відповідності вимогам видання, організації рецензування, обговореннях щодо формування випуску та не впливав на можливість публікації роботи будь-яким іншим чином.

Фінансування.

Робота була виконана в рамках фінансування міжнародного проєкту «Interreg VI-B NEXT Black Sea Basin Programme».

Список літератури

1. Bertrand-Krajewski J.-L., Bournique R., Lecomte V. et al. SIPIBEL observatory: data on usual pollutants (solids, organic matter, nutrients, ions) and micropollutants (pharmaceuticals, surfactants, metals), biological and ecotoxicity indicators in hospital and urban wastewater, in treated effluent and sludge from wastewater treatment plant, and in surface and groundwater. Data in Brief. 2022. Vol. 40. Article 107726.
2. G`kHe D., Ôeftaliciolu M.D., Erden B.A., K`ytepe S. Chronic and acute water-soluble microplastics uptake and effects on growth and reproduction of daphnia magna. Water, Air & Soil Pollution. 2022. Vol. 233. Article 434.
3. Kaur S., Kaur S., Thakur B., Narwat N. Microalgae-based bioremediation of emerging contaminants: techniques, recent developments, and future perspectives. Archives Microbiol. 2026. Vol. 208. Article 29
4. Randhavane Shrikant B., Madaan S. Cultivation and potential application of microalgae in treatment of Pesticide Manufacturing Effluent. Materials Today: Proceed. 2021. Vol. 43, Part 2. P. 1944-1948
5. GrandclJment C., Seyssiecq I., Piram A. et al. From the conventional biological wastewater treatment to hybrid processes, the evaluation of organic micropollutant removal: a review. Water Research. 2017. Vol. 111. P. 297-317.
6. Òkufca D., Kovai A., Prosenc F. et al. Phycoremediation of municipal wastewater: removal of nutrients and contaminants of emerging concern. Sci. Total Environ. 2021. Vol. 782. Article 146949.
7. Devarajan G., Ilango S., Vetrivel A., Nithya T.G. Systematic review on role of microorganisms in bioremediation. Sustainable Environmental Remediation: Avenues in Nano and Biotechnology. Cham: Springer, 2025. P. 479-499. (Environmental Science and Engineering).
8. Randhavane Shrikant B., Madaan S. Cultivation and potential application of microalgae in treatment of Pesticide Manufacturing Effluent. Materials Today: Proceed. 2021. Vol. 43, Part 2. P. 1944-1948.
9. Springer Collection Pollution, Bioremediation and the Environment: thematic collection of scientific articles. Springer Link. URL: https://link.springer.com/collections/jebjdiccdf (14.10.2025).
10. Базаєва А.М., Чужма Н.П., Савенко Н.М. Фітопланктон вирощувального ставу за умов внесення органічного добрива. Біорізноманіття та роль тварин в екосистемах: 2015 рік: Матеріали VIII Міжнар. наук. конф., 2015 р. Дніпро: Ліра, 2015. С. 69-71.
11. Liu R., Li S., Tu Y. et al. Capabilities and mechanisms of microalgae on removing micropollutants from wastewater: a review. J. Environ. Management. 2021. Vol. 285. Article 112149.
12. Rogowska J., Cieszynska-Semenowicz M., Ratajczyk W. et al. Micropollutants in treated wastewater. Ambio. 2020. Vol. 49, N 2. P. 487-503.
13. Wilt A., Butkovskyi A., Tuantet K. et al. Micropollutant removal in an algal treatment system fed with source separated wastewater streams. Journal of Hazardous Materials. 2016. Vol. 304. P. 84-92.
14. Gatidou G., Anastopoulou P., Aloupi M. et al. Growth inhibition and fate of benzotriazoles in Chlorella sorokiniana cultures. Sci. Total Environ. 2019. Vol. 663.
P. 580-586
15. Escudero A., Hunter C., Roberts J. et al. Pharmaceuticals removal and nutrient recovery from wastewaters by Chlamydomonas acidophila. Biochem. Engineer. J. 2020. Vol. 156. Article 107517.
16. Bellido-Pedraza C. M., Torres M. J., Llamas A. The microalgae Chlamydomonas for bioremediation and bioproduct production. Cells. 2024. Vol. 13, N 13. Article 1137.
17. Frascaroli G., Hunter C., Roberts J. et al. Antibiotic removal by three promising microalgae strains: biotic, abiotic routes, and response mechanisms. Water, Air & Soil Pollution. 2024. Vol. 235. Article 600.
18.Wang Q., Liu W., Li X. et al. Carbamazepine toxicity and its co-metabolic removal by the cyanobacter*ia Spirulina platensis*. *Sci. Total Environ.* 2020. Vol. 706. Article 135686.

19. Xiong Q., Liu Y.-S., Hu L.-X. et al. Co-metabolism of sulfamethoxazole by a freshwater microalga *Chlorella pyrenoidosa*. *Water Research*. 2020. Vol. 175. Article 115656.
20. Горшкова О. Г., Гудзенко Т. В., Волювач О. В. та ін. Очищення води від фенолу та іонів важких металів асоціацією бактерій роду Pseudomonas. Мікробіологія і біотехнологія. 2018. № 2 (42). С. 70-80.
21. Суходольська І. Л., Мазур А. І. Акумуляція важких металів вищими водними рослинами різних екологічних груп. Науковий вісник НЛТУ України. 2022. Т. 32, № 6. С. 45-52.
22. Шило Д. О., Клімкіна І. І. Дослідження впливу важких металів на фізіологічну активність Chlorella vulgaris та її здатність до біоакумуляції. Екологічні науки. 2022. № 6 (45). С. 158-161.
23. Danovaro R., Cocozza di Montanara A., Corinaldesi C. et al. Bioaccumulation and biomagnification of heavy metals in marine micro-predators. *Communications Biology.* 2023. Vol. 6. Article 1206.
24. Greene, B. (1984, April). Removal of heavy metal ions from contaminated waters by Chlorella vulgaris. In Proceedings of the 28th Annual New Mexico Water Conference, Las Cruces, NM (pp. 103-115).
25. Dinesh Kumar, S., Santhanam, P., Jayalakshmi, T., Nandakumar, R., Ananth, S., Devi, A. S., & Prasath, B. B. (2015). Excessive nutrients and heavy metals removal from diverse wastewaters using marine microalga Chlorella marina (Butcher). Indian J. Mar. Sci, 44(1).
26. Manzoor, F., Karbassi, A., & Golzary, A. (2019). Removal of heavy metal contaminants from wastewater by using Chlorella vulgaris Beijerinck: A review. Current Environmental Management (Formerly: Current Environmental Engineering), 6(3), 174-187.

Yuriy Boiko
Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
Odessa State Agrarian University
ORCID ID: 0000-0002-3387-0219
e-mail: yuriyalexb@gmail.com

Irina Boiko
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor
Odessa National Medical University
ORCID ID: 0000-0002-3101-8540
e-mail: i.boyko.od@gmail.com

WATER PURIFICATION FROM HEAVY METALS USING CHLORELLA VULGARIS CULTURE

Abstract

Despite the large number of existing wastewater treatment technologies (industrial, land reclamation, domestic), the final chemical composition of wastewater entering natural reservoirs can pose a threat to their ecological state. The aim of the work was to study the use of Chlorella vulgaris microculture for wastewater treatment from soluble forms of heavy metals. The Chlorella vulgaris culture was grown in glass bioreactors on Tamiya nutrient medium. The lighting mode was constant, artificial. The bubbling was: air - from 0.05 ppm to 0.1 ppm, carbon dioxide - from 0.01 ppm to 0.05 ppm. The resulting concentrated culture was added to the volume of wastewater in a ratio of 1:5, the concentration of Chlorella vulgaris in the introduced solution was 5 x 107 cells/ml. The resulting mixture was kept for 15 days, measuring the concentration of copper, zinc, manganese and chromium on the 3rd, 5th, 10th and 15th day. It was found that in the first 5 days, the Chlorella vulgaris culture absorbed more than 50% of the initial amount of each heavy metal. At the same time, the absorption intensity depended on the initial metal concentration; when it increased to toxic values for Chlorella

vulgaris, the absorption process was noticeably slowed down. At a zinc concentration of 2.5 mg/l, on the fifth day 1.5 times less metal ions were absorbed than in the case of a concentration of 0.9 mg/l. The effect of a repeated increase in the chromium concentration on the fifth day was also recorded, which we associate with the mechanisms of its absorption on the outer surface of the Chlorella vulgaris membrane. The study showed that the use of Chlorella vulgaris can become the basis of a highly effective biotechnological method for wastewater treatment from heavy metals.

Keywords: *Chlorella vulgaris, heavy metals, wastewater.*

Reference

1. Bertrand-Krajewski J.-L., Bournique R., Lecomte V. et al. SIPIBEL observatory: data on usual pollutants (solids, organic matter, nutrients, ions) and micropollutants (pharmaceuticals, surfactants, metals), biological and ecotoxicity indicators in hospital and urban wastewater, in treated effluent and sludge from wastewater treatment plant, and in surface and groundwater. Data in Brief. 2022. Vol. 40. Article 107726.
2. G`kHe D., Ôeftaliciolu M.D., Erden B.A., K`ytepe S. Chronic and acute water-soluble microplastics uptake and effects on growth and reproduction of daphnia magna. Water, Air & Soil Pollution. 2022. Vol. 233. Article 434.
3. Kaur S., Kaur S., Thakur B., Narwat N. Microalgae-based bioremediation of emerging contaminants: techniques, recent developments, and future perspectives. Archives Microbiol. 2026. Vol. 208. Article 29
4. Randhavane Shrikant B., Madaan S. Cultivation and potential application of microalgae in treatment of Pesticide Manufacturing Effluent. Materials Today: Proceed. 2021. Vol. 43, Part 2. P. 1944-1948
5. GrandclJment C., Seyssiecq I., Piram A. et al. From the conventional biological wastewater treatment to hybrid processes, the evaluation of organic micropollutant removal: a review. Water Research. 2017. Vol. 111. P. 297-317.
6. Òkufca D., Kovai A., Prosenc F. et al. Phycoremediation of municipal wastewater: removal of nutrients and contaminants of emerging concern. Sci. Total Environ. 2021. Vol. 782. Article 146949.
7. Devarajan G., Ilango S., Vetrivel A., Nithya T.G. Systematic review on role of microorganisms in bioremediation. Sustainable Environmental Remediation: Avenues in Nano and Biotechnology. Cham: Springer, 2025. P. 479-499. (Environmental Science and Engineering).
8. Randhavane Shrikant B., Madaan S. Cultivation and potential application of microalgae in treatment of Pesticide Manufacturing Effluent. Materials Today: Proceed. 2021. Vol. 43, Part 2. P. 1944-1948.
9. Springer Collection Pollution, Bioremediation and the Environment: thematic collection of scientific articles. Springer Link. URL: https://link.springer.com/collections/jebjdiccdf (14.10.2025).
10. Bazaeva A.M., Chuzhma N.P., Savenko N.M. Phytoplankton of a growing pond under conditions of organic fertilizer application. Biodiversity and the role of animals in ecosystems: 2015: Proceedings of the VIII International Scientific Conference, 2015. Dnipro: Lira, 2015. P. 69-71.
11. Liu R., Li S., Tu Y. et al. Capabilities and mechanisms of microalgae on removing micropollutants from wastewater: a review. J. Environ. Management. 2021. Vol. 285. Article 112149.
12. Rogowska J., Cieszynska-Semenowicz M., Ratajczyk W. et al. Micropollutants in treated wastewater. Ambio. 2020. Vol. 49, N 2. P. 487-503.
13. Wilt A., Butkovskyi A., Tuantet K. et al. Micropollutant removal in an algal treatment system fed with source separated wastewater streams. Journal of Hazardous Materials. 2016. Vol. 304. P. 84-92.
14. Gatidou G., Anastopoulou P., Aloupi M. et al. Growth inhibition and fate of benzotriazoles in Chlorella sorokiniana cultures. Sci. Total Environ. 2019. Vol. 663.
P. 580-586

15. Escudero A., Hunter C., Roberts J. et al. Pharmaceuticals removal and nutrient recovery from wastewaters by Chlamydomonas acidophila. Biochem. Engineer. J. 2020. Vol. 156. Article 107517.
16. Bellido-Pedraza C. M., Torres M. J., Llamas A. The microalgae Chlamydomonas for bioremediation and bioproduct production. Cells. 2024. Vol. 13, N 13. Article 1137.
17. Frascaroli G., Hunter C., Roberts J. et al. Antibiotic removal by three promising microalgae strains: biotic, abiotic routes, and response mechanisms. Water, Air & Soil Pollution. 2024. Vol. 235. Article 600.
18.Wang Q., Liu W., Li X. et al. Carbamazepine toxicity and its co-metabolic removal by the cyanobacte*ria Spirulina platensis*. *Sci. Total Environ.* 2020. Vol. 706. Article 135686.
19. Xiong Q., Liu Y.-S., Hu L.-X. et al. Co-metabolism of sulfamethoxazole by a freshwater microalga *Chlorella pyrenoidosa*. *Water Research*. 2020. Vol. 175. Article 115656.
20. Gorshkova O. G., Gudzenko T. V., Volyuvach O. V. et al. Water purification from phenol and heavy metal ions by an association of bacteria of the genus Pseudomonas. Microbiology and Biotechnology. 2018. No. 2 (42). P. 70-80.
21. Sukhodolska I. L., Mazur A. I. Accumulation of heavy metals by higher aquatic plants of different ecological groups. Scientific Bulletin of the National University of Technology of Ukraine. 2022. Vol. 32, No. 6. P. 45-52.
22. Shylo D. O., Klimkina I. I. Research on the influence of heavy metals on the physiological activity of Chlorella vulgaris and its ability to bioaccumulate. Ecological Sciences. 2022. No. 6 (45). P. 158-161.
23. Danovaro R., Cocozza di Montanara A., Corinaldesi C. et al. Bioaccumulation and biomagnification of heavy metals in marine micro-predators. *Communications Biology.* 2023. Vol. 6. Article 1206.
24. Greene, B. (1984, April). Removal of heavy metal ions from contaminated waters by Chlorella vulgaris. In Proceedings of the 28th Annual New Mexico Water Conference, Las Cruces, NM (pp. 103-115).
25. Dinesh Kumar, S., Santhanam, P., Jayalakshmi, T., Nandakumar, R., Ananth, S., Devi, A. S., & Prasath, B. B. (2015). Excessive nutrients and heavy metals removal from diverse wastewaters using marine microalga Chlorella marina (Butcher). Indian J. Mar. Sci, 44(1).
26. Manzoor, F., Karbassi, A., & Golzary, A. (2019). Removal of heavy metal contaminants from wastewater by using Chlorella vulgaris Beijerinck: A review. Current Environmental Management (Formerly: Current Environmental Engineering), 6(3), 174-187.

Стаття надійшла до редакції 20.07.2026
Стаття пройшла рецензування 19.08.2026
Стаття опублікована 30.09.2026