

ЕКОЛОГІЧНІ ТА КОМЕРЦІЙНІ ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ *CHLAMYDOMONAS REINHARDTII* У РЕВІТАЛІЗАЦІЙНИХ ПРОЦЕСАХ

Литвин Б.Б., Петльована В.Р., Таран Н.Ю.

Навчально-науковий центр «Інститут біології та медицини»
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
пр. Академіка Глушкова, 2, 02000, м. Київ
lytvynbogdan164@gmail.com, petlovana@knu.ua, nataliya.taran@knu.ua

Вступ. Актуальність і мета дослідження. Одноклітинна зелена водорість *Chlamydomonas reinhardtii* демонструє значний потенціал для комерційного використання у ревіталізаційних процесах, зокрема фікоремедіації – методі біоремедіації за допомогою водних рослин і водоростей. Фікоремедіація, на відміну від фіторемедіації (яка в основному використовує наземні рослини), використовує унікальні метаболічні можливості водоростей для видалення, розкладання або іммобілізації різних забруднювачів, включаючи важкі метали, органічні забруднювачі та поживні речовини з водою. **Мета** – ремедіація ґрунтів на територіях, які були пошкоджені внаслідок активних воєнних дій, індустріальної недбалості або понаднормового аграрного використання, і подальша ревіталізація зі створенням нових територій за необхідним цільовим призначенням. **Матеріали та методи.** Методи пошуку інформації в друкованих та електронних виданнях, пошукових наукових базах даних, а також методи аналізу, порівняння та узагальнення. **Результати.** Аналіз *C. reinhardtii* в бібліографічних джерелах презентує її як рослину надзвичайно толерантну до широкого спектру важких металів, включаючи кадмій, мідь, свинець, цинк, і здатною їх накопичувати. Ця здатність виникає завдяки кільком механізмам, включаючи внутрішньоклітинну секвестрацію, позаклітинне осадження та біосорбцію. Крім того, ця водорість може ефективно розкладати та детоксикувати органічні забруднювачі, пестициди та вуглеводні. **Висновки.** *C. reinhardtii* при правильному використанні може бути повноцінною альтернативою хімічним добривам і її фікомеліоративна цінність може бути використана як головний інструмент в відновленні понівечених ґрунтів без агресивного впливу на навколишнє середовище. Важливо продовжувати ці дослідження та демонструвати переваги використання цих водоростей у сільськогосподарському секторі. Однією з найперспективніших перспектив є дослідження симбіотичних можливостей цих водоростей з гіперакумулятивними культурами, що може прискорити процес відновлення, забезпечуючи як постачання макроелементів, так і поглинання CO₂, що буде корисним як довгострокова техніка. **Ключові слова:** Фікомеліорація, макроелементи, секвестрація, відновлення ґрунтів, важкі метали, біодобрива.

Ecological and commercial prospects for the use of *Chlamydomonas reinhardtii* in revitalization processes. Lytvyn B., Petlovana V., Taran N.

Introduction. Relevance and purpose of the study. The single-celled green algae *Chlamydomonas reinhardtii* shows significant potential for commercial use in revitalization processes, particularly phytoremediation—a method of bioremediation using aquatic plants and algae. Phytoremediation, unlike phytoextraction (which mainly uses terrestrial plants), utilizes the unique metabolic capabilities of algae to remove, decompose, or immobilize various pollutants, including heavy metals, organic pollutants, and nutrients from water bodies. **The goal** is to remediate soils in areas that have been damaged by active warfare, industrial negligence, or excessive agricultural use, and then revitalize them by creating new areas for the necessary purposes. **Materials and methods.** Methods of searching for information in printed and electronic publications, scientific databases, as well as methods of analysis, comparison, and generalization. **Results.** Analysis of *C. reinhardtii* in bibliographic sources presents it as a plant that is extremely tolerant to a wide range of heavy metals, including cadmium, copper, lead, and zinc, and capable of accumulating them. This ability arises from several mechanisms, including intracellular sequestration, extracellular precipitation, and biosorption. In addition, this algae can effectively decompose and detoxify organic pollutants, pesticides, and hydrocarbons. **Conclusions.** When used correctly, *C. reinhardtii* can be a viable alternative to chemical fertilizers, and its phytomeliorative value can be used as a key tool in the restoration of degraded soils without aggressive impact on the environment. It is pivotal to continue this research and to showcase the merits of using this algae in agricultural sector. One of the most promising prospects is to explore symbiotic capabilities of this algae with hyper accumulative crops that could expedite remediation process by providing both macro-element supply and CO₂ sequestration that would be beneficial as a long-term technique. **Key words:** Phytomelioration, macroelements, sequestration, soil restoration, heavy metals, biofertilizers.

Вступ. На підставі сучасних міжнародних наукових і практичних розробок ревіталізацію розглядають як мультидисциплінарний комплекс заходів пов'язаний з процесами відновлення життя, зокрема фіторевіталізація (від гр. *phyton* – рослина, лат. *re* ... – відновлення та *vita* – життя, дослівно:

повернення життя) – термін, який вказує на процеси повернення життя завдяки рослинним організмам. Принципом фіторевіталізації є не просто медіація та стабілізація понівечених війною територій, а реабілітація контамінованих зон для створення нових функціональних середовищ. Використання водо-

ростей для відновлення довкілля, або фікоремедіація, є потенційним екологічно безпечним способом зменшення забруднюючих речовин в оточуючому середовищі і являє собою одну з складових ревіталізаційних процесів. Організми, що використовуються в ремідаційних технологіях, є однією з основних відмінностей між фіторемедіацією та фікоремедіацією. Наземні рослини є основним інструментом фіторемедіації для вилучення, розщеплення або іммобілізації забруднювачів з ґрунту, в той час як фікоремедіація використовує особливі метаболічні властивості водоростей, такі як швидкий ріст, велика біомаса та різноманітність метаболічних шляхів, для очищення довкілля від різних забруднювачів. Окрім процесів біосеквстрації важких металів в своїх клітинах [1,2], водорості можуть бути й необхідним добривом для відновлення макроелементного складу ґрунту [3]. Завдяки широкому поширенню по всьому світу і здатності до дуже швидкої реколонізації забруднених територій [4] представники виду *Chlamydomonas*, є перспективними об'єктами для розробки екологічно безпечних та комерційно обґрунтованих фікоремедіаційних технологій в програмах ревіталізації забруднених воєними діями територій.

Метою даної роботи є визначити екологічну та комерційну доцільність використання водоростей у фіторевіталізаційних процесах.

Методи дослідження ревалентний аналіз ремідаційних технологій за участю водоростей. Об'єкт дослідження – представник виду *Chlamydomonas*, Хламідомонада *C. reinhardtii*. – одноклітинний організм з майже сферичною клітинною стінкою навколо цитоплазми і центральним ядром. Хламідомонада може виживати в багатьох середовищах існування. Їх можна знайти в морській, прісній воді, льоду, а іноді і в ґрунті. Деякі види хламідомонад добре переносять і активно функціонують в екстремально холодних або екстремально кислих умовах.

C. reinhardtii є достатньо добре вивченим біологічним модельним організмом, частково завдяки простоті культивування та можливості генетичних трансформацій.

Результати. Аналіз об'єктів з ремідаційним потенціалом показав, що *C. reinhardtii* є перспективним кандидатом для створення фікоремедіаційних технологій, зокрема тих що пов'язані з ремідацією важких металів. *C. reinhardtii* надзвичайно добре накопичує такі важкі метали як кадмій, мідь, свинець, цинк завдяки встановленим механізмам виведення металів які базуються на їх внутрішньоклітинній секвстрації, синтезі захисних ензимів (тіоредоксину та плутаредоксину) та осадженні сполук у вакуолі [1,5]. Окрім того, показана здатність *C. reinhardtii* прискорювати процеси деградації органічних забруднювачів. Так, при додаванні суспензії *C. reinhardtii* до стічних вод підприємства по створенню біомаси, відмічена більш інтенсивна дегра-

дація органічних забруднювачів – азоту на 42,2% – 55,0% та фосфору на 12,5% – 15,4% після 10 днів аналізу [6].

Такі функціональні властивості *C. reinhardtii*, в свою чергу, можуть бути корисними і для процесів фікоревіталізації ґрунтів, які через воєнні дії були забруднені важкими металами та які потребують більш дешевого та масового підходу до вилучення забруднюючих сполук задля подальшого користування.

За даними літератури комерційний потенціал *C. reinhardtii* у фікоремедіації є значним і виражається у таких показниках як:

- *універсальність* – вони є толерантними до різних умов навколишнього середовища та здатні відновлювати різні забруднювачі [1];

- *економічна ефективність* – *C. reinhardtii* є низьковитратною культурою при вирощуванні на біоплівках первинних партій з подальшим внесенням у субстрат (7), для широкомасштабного та промислового застосування;

- *продукти з доданою вартістю* – подальше використання біомаси може бути ефективним для виробництва біопалива, а також кормів для тварин і фармацевтичних виробів [8];

- *комерційна вартість* – безпосередньо комерційна вартість використання *C. Reinhardtii* для фіторемедіації оцінюються на основі економічної життєздатності, технічної здійсненності, екологічної стійкості, тощо. Сучасна схема, узагальнююча потенційні функції ціанобактерій у сталому сільському господарстві та навколишньому середовищі, представлена у наведеному рисунку (Рис. 1).

Багатогранність функцій ціанобактерій регламентується певними технологічними процесами які потребують спеціального дослідження. Вони передбачають, зокрема, визначення та оцінку важливих бар'єрів на шляху комерціалізації технологій фіторемедіації на основі *C. reinhardtii*, що пов'язані з такими викликами як оптимізація умов вирощування, розробка ефективних методів збору біомаси та її довгострокову стійкість в фіторемедіаційній системі. Необхідно враховувати і можливі синергії між використанням *C. reinhardtii* у фіторемедіаційних процесах з іншими сферами застосування, наприклад, виробництвом біопалива або вирощування агрокультур. Можливості використання ціанобактерій ґрунтах для підвищення складу макроелементів, разом з можливістю вступати в реакції з іншими представниками мікробіоти в симбіотичному форматі, роблять оптимальним вибір *C. reinhardtii* для фікоремедіації та розширеного дослідження самих принципів відновлення екосистем і антропоморфного впливу на них.

В більшості випадків, водорості *C. Reinhardtii* використовувалися в системах очищення стічних вод через свою здатність швидко розмножуватись саме у водних середовищах. У цьому агрегатному стані,

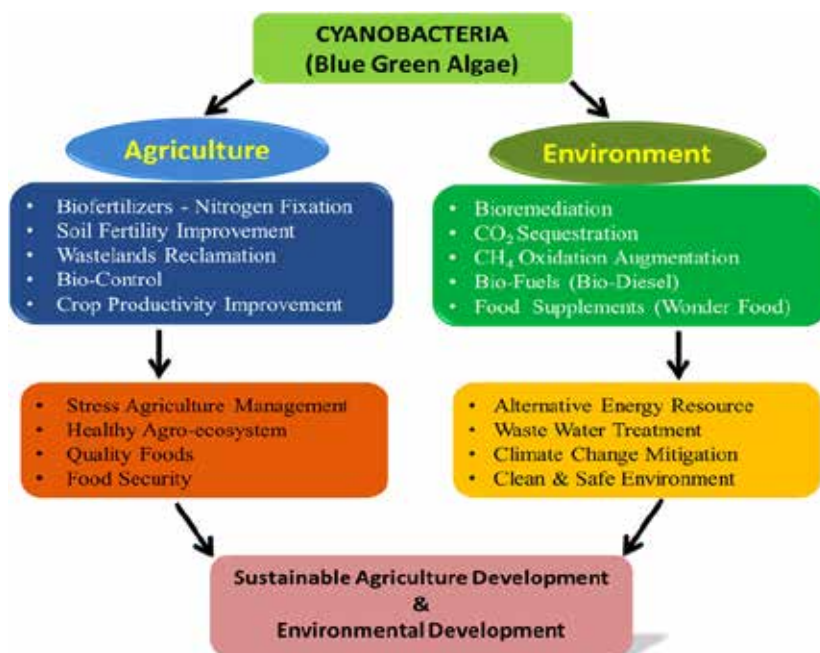


Рис. 1. Узагальнююча схема функцій ціанобактерій у сталому сільському господарстві та навколишньому середовищі [3]

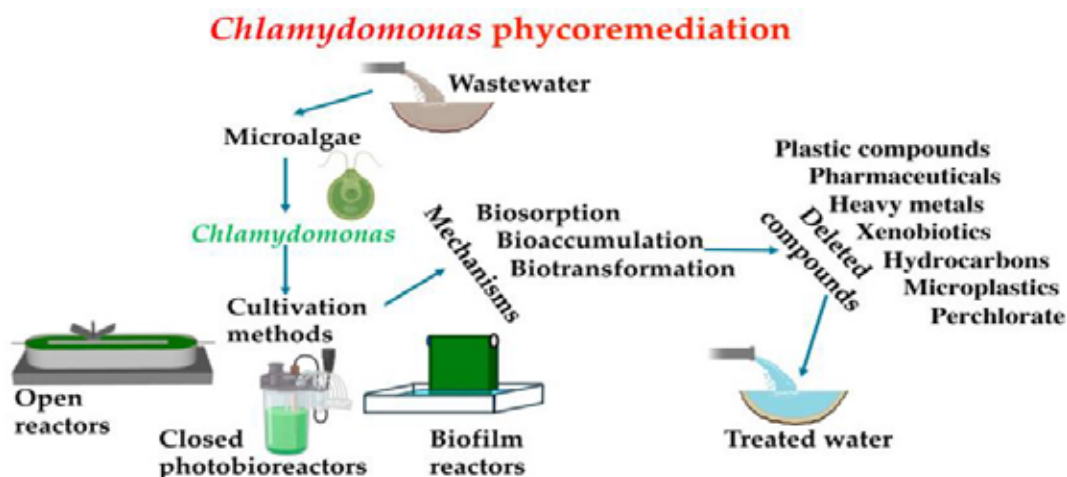


Рис. 2. Схема процесу очищення стічних вод за допомогою хламідомонадо-бактеріальних консорціумів [4]

клітини мають майже прямий доступ до хімічних сполук, які треба розкласти, і подальше видалення залишків забруднення і контамінованих частинок водоростей реалізується поверхневою фільтрацією (Рис. 2).

Такий технологічний процес є доцільним за необхідності подальшого використання водоростей для реалізації у технологіях виробництва біопалива [9] і біогідрогену [10], де необхідна висока продуктивність за дуже малих початкових інвестицій і де контаміновані представники очищаються під час каталітичних процесів утворення палива.

Для використання представників *C. Reinhardtii* в фікоремедіації ґрунту, необхідно створити симбіотичні зв'язки між водоростями та бактеріями, які б

допомагали у відновленні макроелементного складу ґрунту. Так, було проаналізовано, що комбінація з *Methylobacterium aquaticum* дозволила водоростям наростити більше біомаси у середовищі з високим вмістом проліну, де бактерії передавали водорості частину NH₄⁺, отриманого в результаті свого метаболізму (Рис. 3). У свою чергу, *C. reinhardtii* передає частину свого фіксованого вуглецю у вигляді гліцерину *M. aquaticum*, яка використовує його як джерело вуглецю [11].

Іншим симбіотичним прикладом є комбінація *Chlamydomonas*–*Azotobacter*, де *Chlamydomonas* розкладає наявні в субстраті вуглеводні для росту *Azotobacter*, який, в свою чергу, секвеструє нітроген

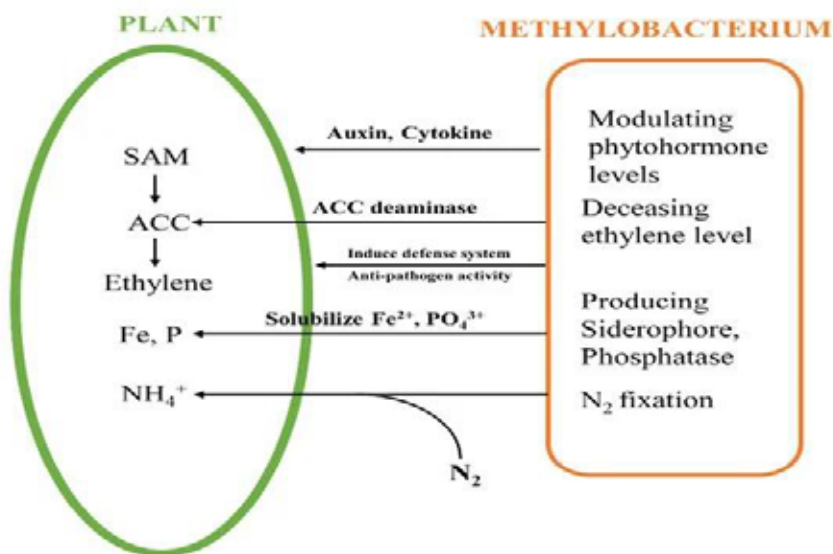


Рис. 3. Механізми, за допомогою яких *Methylobacterium* spp. сприяють росту рослин [16]

та диоксид вуглецю з повітря для росту водорості [12]. Така комбінація дозволяє акумулювати в ґрунті необхідний для росту рослин азот після декомпозиції клітин водоростей.

Наукові дослідження показують, що фікоремедіація коштує дешевше, ніж традиційні методи боротьби із забрудненням довкілля. Фінансування біовідновлення за допомогою рослин коштує від \$20 до \$40 за тону сміття, тоді як хімічні методи вимагають від \$100 до \$500 [13].

Для порівняння, процес очищення нафтових вуглеводнів за допомогою фіторемедіації коштує від \$2500 до \$15000 за гектар, мікробіологічна обробка – від \$20 000 до \$60 000 за гектар, а мікробіологічна обробка *in situ* – від \$7500 до \$20 000 за гектар [14].

Використання водоростей допомагає уникнути використання хімічних добрив вартістю приблизно \$5584 (доларів США) на акр на рік, використовуючи їх біомасу як гній [15].

Дискусія і висновки. Наш огляд показує, що *Chlamydomonas reinhardtii* дуже добре підходить для використання водоростей у ревіталізаційних технологіях та здійсненні екологічних послуг з відновлення порушених просторів. Ця водорість має багато переваг для очищення забруднених місць: вона видаляє важкі метали, розщеплює шкідливі органічні забруднювачі та добре росте у великих кількостях.

Серед головних переваг у використанні *C. reinhardtii* у фікоремедіації можна зазначити наступне:

- Висока ефективність: Швидкість росту та здатність утворювати велику кількість біомаси надає велику перевагу в порівнянні зі стандартними методами хімічного та механічного очищення.

- Універсальність: Водорість може справлятися з різними типами забруднень і рости здоровою в широкому спектрі несприятливих умов.

- Економічна доцільність: Розсіювання водорості потребує мінімальних витрат і швидкість розповсюдження дозволяє проводити фікоремедіацію на більших площах за короткі терміни.

- Додана вартість біомаси: Біомаса з *C. reinhardtii* може бути перетворена на кілька різних товарних продуктів, включаючи біопаливо, корм для тварин тощо.

Серед основних питань, які потребують ретельного дослідження можна визначити:

- Оптимізація умов вирощування: Проведення додаткових досліджень для створення оптимальних умов вирощування водоростей в умовах *in situ*

- Розробка ефективних методів збору продуктивної біомаси: Знайти кращі способи збору біомаси водоростей, щоб процеси екстракції з ґрунту були максимально не інтрузивними

- Дослідження взаємодії з іншими організмами: Вивчити, як *C. reinhardtii* взаємодіє з більшою добірною організмів для створення більш ефективних симбіотичних ланцюгів.

В подальших дослідженнях будуть розглянуті такі питання:

- Вивчення методів модифікації генів *C. reinhardtii*, задля покращення її здатності поглинати певні забруднювачі довкілля.

- Створення кращих процедур вирощування та збору водоростей у великих масштабах.

- Створення бізнес-моделі, яка буде прикладом для подальших проектів по відновленню територій від антропогенних забруднювачів.

З розвитком досліджень і розробок використання *Chlamydomonas reinhardtii* для очищення може допомогти захистити наше довкілля та сприяти кращому майбутньому розвитку.

Література

1. Howe, Gregg, Sabeeha Merchant. Heavy Metal-Activated Synthesis of Peptides in *Chlamydomonas reinhardtii*. 1992. *Plant Physiology*, Vol. 98, № 1, P. 127–136
2. Samadani, Mahshid, David Dewez. Cadmium accumulation and toxicity affect the extracytoplasmic polyphosphate level in *Chlamydomonas reinhardtii*. 2018 *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Vol. 166, P. 200–206
3. Chittoraa, Deepali, Mukesh Meenaa, Tansukh Barupala, Prashant Swapnilb, Kanika Sharmaa. Cyanobacteria as a source of biofertilizers for sustainable agriculture. 2020. *Biochemistry and Biophysics Reports*. Volume 22, 100737
4. Torres, María J., Carmen M. Bellido-Pedraza and Angel Llamas. Applications of the Microalgae *Chlamydomonas* and Its Bacterial Consortia in Detoxification and Bioproduction. 2024. *Life*, Vol. 14 № 8, P. 940
5. Gillet, Sylvie, Paulette Decottignies. Cadmium response and redoxin targets in *Chlamydomonas reinhardtii*: A proteomic approach. 2006. *ORIGINAL PAPER* Vol. 89, P. 201–211
6. Kong Q.X., Li L., Martinez B., Chen P., Ruan R. (2010) Culture of Microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* in Wastewater for Biomass Feedstock Production. 2010. *Applied Biochemistry and Biotechnology* Vol. 160, P. 9–18.
7. Moreno Osorio J.H., Pollio A., Frunzo L., Lens P.N.L., Esposito G. A Review of Microalgal Biofilm Technologies: Definition, Applications, Settings and Analysis. 2021. *Frontiers in Chemical Engineering*. Volume 3. 737710
8. Scranton, Melissa A, Joseph T Ostrand, Francis J Fields, Stephen P Mayfield. *Chlamydomonas* as a model for biofuels and bio-products production. 2015. *The Plant Journal*. Vol. 82, P. 523–531
9. Work VH, Radakovits R, Jinkerson RE, Meuser JE. Increased lipid accumulation in the *Chlamydomonas reinhardtii* sta7–10 starchless isoamylase mutant and increased carbohydrate synthesis in complemented strains. 2010. *ASM Journals*. Vol. 9, №. 8
10. Melis A, Zhang L, Forestier M, Ghirardi ML. (2000). Sustained photobiological hydrogen gas production upon reversible inactivation of oxygen evolution in the green alga *Chlamydomonas reinhardtii*. 2010. *Plant Physiology*, Volume 122, № 1, P. 127–136
11. Torres, M.; Gonzalez-Ballester, D.; Gomez-Osuna, A.; Galván, A.; Fernandez, E.; Dubini, A. *Chlamydomonas*-*Methylobacterium Oryzae* Cooperation Leads to Increased Biomass, Nitrogen Removal, and Hydrogen Production. 2022. *Bioresource Technology*. Vol. 352, 127088
12. Preininger, Eva, Tamas Ponyi, Livia Sarkadi, Peter Nyitrai, and Istvan Gyurjan. Long-living *Azotobacter*-*Chlamydomonas* association as a model system for plant-microbe interactions. 2006. *Symbiosis*. Vol. 42 № 1, P. 45
13. Salt, D. E., R. D. Smith, and I. Raskin. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. 1998. *Plant Physiology*. Vol. 49 № 643 P.68
14. Cunningham, S. D., T. A. Anderson, A. P. Schwab and F. Hsu, Adv. Agron. Phytoremediation of Soils Contaminated with Organic Pollutants. 1996. *Advances in Agronomy*. Vol. 56, P. 55–114
15. Sengupta, Swagata Laxmi, Rajib Ghosh Chaudhuri, Susmita Dutta (2023). A critical review on phycoremediation of Pollutants from Wastewater – A Novel Algae Based Secondary Treatment with the Opportunities of Production of Value-Added Product. 2023. *Research Square*.
16. Zhang, Cong, Meng-Ying Wang (2021) Potentials, Utilization, and Bioengineering of Plant Growth-Promoting *Methylobacterium* for Sustainable Agriculture. 2021. *Cells*. Vol. 13. 1137

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025