

МЕТОДИ ЗАСТОСУВАННЯ ШТАМІВ ХЛОРЕЛИ

Файчук Володимир

аспірант

Пашкевич Леонід

аспірант

Кафедра екології, хімії та технологій захисту довкілля
Вінницький національний технічний університет, Україна

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 [1-6], зокрема тих, що стосуються використання хлорели в екологічних технологіях, можна виділити основні методи внесення, які описані нижче:

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 – 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 [7] показало, що внесення суспензії *Chlorella vulgaris* у ґрунти, забруднені нафтопродуктами, сприяло зниженню їх вмісту на 40–60% за 60 днів. Також даний метод можна використовувати для очищення стічних вод, де суспензію додають у резервуари зі стічними водами для видалення азоту, фосфору та важких металів. Наприклад, [8] повідомили про 80% видалення нітратів із комунальних стоків за 7 днів.

Метод простий у застосуванні, володіє швидким поширенням клітин та високою біологічною активністю, проте чутливий до зовнішніх умов (температура, pH, контамінація) та потребує регулярне 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 із верхнім шаром ґрунту для видалення важких металів і органічних забруднювачів. Дослідження [9] показали, що біопрепарати на основі *Chlorella vulgaris* підвищують біологічну активність ґрунту на 25% і видаляють до 70% кадмію за 30 днів. Також даний метод можна використати для очищення водойм, де іммобілізовані клітини хлорели додають у забруднені водойми для поглинання поживних речовин і токсинів. Дослідження [8] продемонструвало 85% видалення фосфатів із водойм за допомогою іммобілізованої хлорели.

Метод зручний у зберіганні і транспортуванні хлорели, має тривалий термін дії та стійкість до зовнішніх умов. Проте він має вищі витрати на підготовку біопрепаратів та повільніше вивільнення активних клітин.

3. Використання фотобіореакторів для попереднього культивування та внесення. Хлорелу вирощують у фотобіореакторах [10] для отримання високої концентрації біомаси, яку потім вносять у об'єкти довкілля у вигляді суспензії або концентрованої біомаси. Метод може застосовуватися для вловлювання CO₂, де біореактори встановлюють на промислових об'єктах для уловлювання CO₂ із димових газів. Отриману біомасу можна використовувати для подальшої переробки або внесення в ґрунт. У дослідженні [11] повідомили про 95% ефективність уловлювання CO₂ у трубчастих фотобіореакторах із *Chlorella vulgaris*. Також даний метод можна використати для очищення стічних вод, де біомасу з біореакторів додають у системи очищення стоків для видалення поживних речовин і токсинів. У дослідженні [12] 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 володіє високими капітальними та експлуатаційними витрати і має потребу в спеціалізованому обладнанні.

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 [13] повідомили про 92% видалення нафтопродуктів з ґрунту за 20 днів при спільному використанні *Chlorella vulgaris* і бактерій. Також цей метод можна використати для фіторемедіації, де хлорелу вносять у ризосферу рослин для стимуляції їх росту та поглинання забруднювачів. [14] показали, що внесення хлорели в ґрунт із рослинами кукурудзи підвищує видалення цинку на 30%.

Метод володіє синергетичним ефектом, що 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 [15] показало, що *Chlorella pyrenoidosa* 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) [10]. ГМШХ з підвищеною стійкістю до токсинів або покращеною 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.

Список використаних джерел

1. 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, doi: <https://doi.org/10.4236/jep.2017.81001>.
2. 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, doi: <https://doi.org/10.3390/biotech12030053>.
3. 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108156>.
4. 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.453>.
5. E. Kyrtzopoulou, 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, doi: <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7020035>.
6. Miguel A. Vale, António Ferreira, José C.M. Pires, Ana L. Gonçalves, *CO2 capture using microalgae*, Woodhead Publishing, 2020, Pages 381-405, ISBN 9780128196571, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00017-7>.
7. 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, doi: <https://doi.org/10.32718/nvlvet-a10150>.
8. 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, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.017>.
9. V. Kirsanova, "The expediency of cultivating and using microalgae (*chlorella*) as organic fertilizers," *Ecological Sciences*, no. 1(28), pp. 324–327, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.1-28.52>.

10. 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, doi: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.9>
11. 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, doi: <https://doi.org/10.3390/molecules27154669>.
12. 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, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-22813-6_2.
13. V. R. V. Ashwaniy, 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, p. 100926, Aug. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100926>.
14. X. Li et al., "Nutrient removal from swine wastewater with growing microalgae at various zinc concentrations," vol. 46, pp. 101804–101804, Mar. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101804>.
15. 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*," *IIUM Engineering Journal*, vol. 12, no. 4, Jan. 1970, doi: <https://doi.org/10.31436/iiumej.v12i4.214>.

SOIL POLLUTION WITH HEAVY METALS AS A RESULT OF MILITARY ACTIONS

Mykhaylova Viktoriia

Postgraduate

Tykhonova Olena

Ph.D., Associate Professor

Department of Ecology and Botany

Sumy National Agrarian University, Ukraine

Military operations are a powerful factor in disrupting the ecological balance. One of the most dangerous consequences is soil contamination with heavy metals that enter the environment as a result of explosions of ammunition, destruction of military equipment, combustion of fuel and petroleum products [1]. Studies show that the affected areas are characterized by an excess of background levels of lead by 5.4 times, zinc by 3.9 times, cadmium by 1.4 times, copper by 4.6 times, and manganese by 4.8 times [2]. High concentrations of these elements are especially dangerous for agricultural soils, since they accumulate in plants and enter the human body through the food chain, provoking toxic, carcinogenic and mutagenic effects.

Heavy metals have high chemical stability, are well sorbed by soil colloids and form sparingly soluble compounds with phosphates and hydroxides, which contributes