

## ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНЕ ВИЛУЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ З ПРИРОДНИХ ВОД ЗА ДОПОМОГОЮ МІКРОВОДОРОСТІ CHLORELLA VULGARIS POLICARP

Вінницький національний технічний університет

### Анотація

У роботі проаналізовано сучасний стан забруднення природних вод важкими металами та розглянуто перспективи використання штаму мікроводорості *Chlorella vulgaris Policarp* як біосорбенту для екологічно безпечного вилучення токсичних металів (Pb, Cd, Cu, Zn, Cr, Ni та ін.). Встановлено, що комбінація біосорбції хлорелою з магнітокерованими технологіями (модифікація біомаси магнітними наночастинками) дозволяє суттєво підвищити ефективність видалення металів, запобігти десорбції та забезпечити швидке відокремлення насиченої металами біомаси. Показано переваги методу порівняно з традиційними фізико-хімічними способами (хімічне осадження, іонний обмін, зворотний осмос) щодо мінімального утворення вторинних токсичних відходів, низьких експлуатаційних витрат та можливості подальшого використання біомаси (біодизель, біогаз). Найвищу ефективність метод демонструє при інтеграції з «зеленим» синтезом наночастинок на основі екстрактів хлорели.

**Ключові слова:** важкі метали, біоремедіація, *Chlorella vulgaris Policarp*, біосорбція, магнітна сепарація, очищення природних вод, зелений синтез наночастинок.

### Abstract

The work analyzes the current state of natural water pollution with heavy metals and considers the prospects of using the microalga *Chlorella vulgaris Policarp* strain as a biosorbent for environmentally safe removal of toxic metals (Pb, Cd, Cu, Zn, Cr, Ni, etc.). It was established that the combination of biosorption by *Chlorella* with magnet-controlled technologies (modification of biomass with magnetic nanoparticles) significantly increases the efficiency of metal removal, prevents desorption and ensures rapid separation of metal-saturated biomass. The advantages of the method compared to traditional physico-chemical methods (chemical precipitation, ion exchange, reverse osmosis) are shown in terms of minimal formation of secondary toxic waste, low operating costs and the possibility of further biomass utilization (biodiesel, biogas). The highest efficiency of the method is demonstrated when integrated with the "green" synthesis of nanoparticles based on *Chlorella* extracts.

**Keywords:** heavy metals, bioremediation, *Chlorella vulgaris Policarp*, biosorption, magnetic separation, natural water purification, green synthesis of nanoparticles.

### Вступ

Забруднення природних вод важкими металами залишається однією з ключових екологічних проблем XXI століття через їх високу токсичність, біоаккумуляцію та стійкість у довкіллі. Традиційні методи очищення (осадження, іонний обмін, мембранні технології) часто супроводжуються утворенням значних обсягів токсичних вторинних відходів і високими експлуатаційними витратами. Біоремедіація за допомогою мікроводоростей роду *Chlorella* розглядається як перспективний екологічно орієнтований підхід, що поєднує високу ефективність сорбції, низьку енергоємність і можливість циклічного використання біомаси.

### Постановка задачі та мета роботи

Метою роботи є аналіз ефективності вилучення важких металів з природних вод за допомогою біосорбції штамом *Chlorella vulgaris Policarp* та дослідження шляхів інтенсифікації цього процесу. Основним завданням є оцінка можливостей магнітокерованих технологій для забезпечення повного вилучення сорбенту без вторинного забруднення.

### Методологія дослідження

Метод очищення водних об'єктів за допомогою штаму *Chlorella vulgaris Policarp* базується на

синергії кількох етапів. Клітини хлорели мають складну клітинну стінку, багату на полісахариди, ліпіди та білки, які виконують функцію біосорбентів, активно зв'язуючи іони металів [1].

Для вирішення проблеми вилучення насиченої токсикантами біомаси застосовується "зелений синтез" наночастинок (наприклад, фериту міді  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ ), де екстракти хлорели виступають відновлювачами та стабілізаторами. Модифікація клітин магнітними наночастинами дозволяє швидко збирати мікрородорості за допомогою зовнішніх магнітних полів. Оптимальними умовами для культивування хлорели є температура 25-30°C та освітленість із фотоперіодом 12/12 або 16/8 год.

### **Обговорення експериментальних даних**

Застосування магнітокерованих біосорбентів на основі *Chlorella vulgaris* демонструє значну технологічну перевагу, оскільки при цьому практично повністю відсутній процес десорбції іонів металів. Дослідження підтверджують, що ефективність видалення стійких забруднювачів за допомогою таких систем сягає 79-100%. Крім того, фотосинтетична активність водоростей сприяє збагаченню води киснем, що покращує її окислювально-відновний потенціал.

Еколого-економічні розрахунки доводять рентабельність альголізації: вартість суспензії хлорели становить близько 13-15 грн/л, що дозволяє проводити профілактичне очищення 1 гектара водойми з мінімальними операційними витратами порівняно з механічним днопоглибленням чи капітальним будівництвом систем аерації. Додатковою перевагою є можливість використання відпрацьованої біомаси, насиченої ліпідами, для подальшого виробництва біогазу або біодизелю, що повністю відповідає принципам безвідходної циклічної економіки.

### **Висновки**

Застосування штаму *Chlorella vulgaris* Poliscarp у поєднанні з магнітокерованими технологіями та зеленим синтезом наночастинок є перспективним екологічно безпечним методом вилучення важких металів з природних вод. Метод вигідно відрізняється від традиційних технологій мінімальним утворенням вторинних відходів, низькими експлуатаційними витратами та можливістю інтеграції в принципи циклічної економіки.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Улицький О.А., Пашкевич Л.П. ВИКОРИСТАННЯ ШТАМУ МІКРОВОДОРОСТІ CHLORELLA VULGARIS POLIKARP ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПІСНИХ ВОДОЙМ ВІД ТЕХНОГЕННИХ ЗАБРУДНЕНЬ. // Екологічні науки. – 2023.
2. Beatriz Cardoso, Glauco Nobrega, Mariana Machado, Rui A. Lima. Green synthesis of copper ferrite-based nanofluids using *Chlorella vulgaris* for heat transfer enhancement. // Journal of Molecular Liquids. – 2025.
3. Наказ МОЗ України від 02.05.2022 № 721 "Про затвердження Гігієнічних нормативів якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення".
4. Наказ від 21.07.2022 № 252 Про затвердження Методики визначення збитків, заподіяних внаслідок забруднення та/або засмічення вод, самовільного користування водними ресурсами.

**Волочій Назар Олександрович** – студ. групи ТЗД-226, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, ел. адреса: [eco.curtain211@aleeas.com](mailto:eco.curtain211@aleeas.com)

Науковий керівник: **Петрук Роман Васильович** – проф. кафедри екології та екологічної інженерії, д.т.н, провідний науковий співробітник, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця