УДК 579.68:579.89:606:628.31 *https://doi.org/10.31861/biosystems2026.02.289*

ВПЛИВ АЛЬГІНАТНОЇ ІММОБІЛІЗАЦІЇ *NOSTOC COMMUNE* НА КІНЕТИКУ ВИЛУЧЕННЯ ІОНІВ КУПРУМУ З ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА

Л.В. ХУДА, Л.В. ГУМЕНЮК

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна, 58012
l.khuda@chnu.edu.ua, humeniuk.liliana@chnu.edu.ua

Зростання техногенного та мілітарного навантаження на водні екосистеми України внаслідок бойових дій, вибухів боєприпасів і руйнування промислової інфраструктури зумовлює нагальну потребу у розробці та вдосконаленні біотехнологічних підходів для очищення води від важких металів. Серед воєнних полютантів особливе місце посідає купрум, високі концентрації якого виявляють виражену альгіцидну та цитотоксичну дію на гідробіонти. У роботі проведено порівняльну оцінку ефективності вилучення іонів купруму з водного середовища за допомогою вільносуспензійної та іммобілізованої в 1,5%-й альгінатний гель культури ціанобактерії Nostoc commune за умов широкого діапазону токсичного навантаження (1–100 ГДК) протягом 15 діб.

Установлено, що іммобілізація клітин ностоку в альгінатний матрикс стримує інтенсивність їх проліферації (чисельність у межах 1,8–2,2×10^6 кл/мл проти 9,4–9,8×10^6 кл/мл у суспензії), що зумовлено механічними обмеженнями та дифузійним бар'єром. Водночас гелевий носій забезпечує стабільно високий рівень життєздатності ціанобактерій (77–92,4%) та ефективно екранує їх від купрум-індукованого стресорного впливу на початкових етапах культивування. У суспензійній культурі за 100 ГДК зафіксовано стрімку загибель клітин (виживаність знижувалась до 53% на 3-тю добу) з подальшим спалахом чисельності на 12–15-ту добу внаслідок компенсаторного ефекту.

Дослідження динаміки вилучення купруму методом атомно-абсорбційної спектрометрії підтвердило високу деконтамінаційну здатність обох форм N. commune. Проте іммобілізована система демонструвала виражену перевагу на початкових етапах і досягала максимального ступеня очищення середовища (залишковий вміст купруму близько 30%) за навантаження 5 ГДК на 15-ту добу. Зіставлення низького приросту біомаси зі стабільно високим відсотком зв'язування металу доводить, що іммобілізовані клітини N. commune володіють значно вищою питомою сорбційною ємністю на одиницю біомаси. Висока ефективність біоремедіації забезпечується синергією первинної іонообмінної сорбції альгінатним матриксом та подальшої внутрішньоклітинної біоакумуляції. Отримані результати підтверджують високий потенціал використання альгінатних форм N. commune для глибокого очищення водних середовищ без необхідності утилізації значних об'ємів відпрацьованої надлишкової біомаси.

Ключові слова: Nostoc commune, купрум, іммобілізація, альгінатний гель, біоремедіація, біосорбція, біоакумуляція, важкі метали

Вступ. З огляду на зростання техногенного та мілітарного навантаження на водні екосистеми України особливої актуальності набуває розробка та вдосконалення біотехнологічних підходів для очищення води від важких металів. Внаслідок вибухів боєприпасів, пожеж, горіння військової техніки, а також руйнування промислових підприємств, очисних споруд, систем водопостачання та складів паливно-мастильних матеріалів у довкілля потрапляють значні обсяги токсичних металів, серед яких свинець, кадмій, мідь, цинк, хром та нікель (Yashchenko et al., 2025). Ці полютанти здатні накопичуватися у водоймах, порушуючи екологічну рівновагу та створюючи серйозну загрозу для водних організмів і здоров'я людини. Мідь посідає серед воєнних забруднювачів особливе місце, оскільки є основним матеріалом для гільз, оболонок куль і артилерійських снарядів. Так, у ґрунтах півдня України концентрації Cu, Pb, Zn, Cd, Ni та інших елементів перевищують гранично допустимі в 1,2–11 разів, що пов'язують із застосуванням певних типів боєприпасів (Shybanova et al., 2025). Забруднення ґрунту та водних ресурсів важкими металами фіксується на значних площах, зокрема поблизу Дніпра, Сіверського Дінця та їхніх приток (United Nations Environment Programme, 2022).

Важкі метали вирізняються високою стійкістю у природних умовах, біоакумуляцією та токсичністю навіть у низьких концентраціях. Класичні фізико-хімічні методи очищення води

дають швидкий результат, але часто є дорогими, енергозатратними і можуть формувати вторинні відходи, поводження з яким потребує додаткових витрат (Lourembam et al., 2025). У зв'язку з цим особливу перспективу представляють біотехнологічні підходи, засновані на використанні мікроорганізмів, зокрема ціанобактерій роду *Nostoc*, які здатні до біосорбції, біоакумуляції та біотрансформації токсичних сполук. Завдяки своїй високій екологічній пластичності вони здатні ефективно функціонувати та нарощувати біомасу навіть у несприятливих умовах, а екологічна безпека й низька собівартість культивування роблять їх перспективним об'єктом для біотехнологічних розробок (Lourembam et al., 2025; Cheban et al., 2020).

Вилучення металів ціанобактеріями відбувається двома основними шляхами: біосорбцією та біоакумуляцією. Біосорбція є поверхневим процесом, при цьому іони металів зв'язуються функціональними групами клітинної поверхні практично без метаболічних витрат. Натомість біоакумуляція відбувається всередині клітини - це повільніший, енергозалежний процес, який супроводжується детоксикацією металу, наприклад, зв'язуванням з металозв'язуючими пептидами. Поєднання обох механізмів забезпечує ціанобактеріям високий потенціал вилучення металів із водного середовища. Проте, ефективність таких біоремедіаційних систем значною мірою залежить від стабільності біомаси мікроорганізмів та можливості її багаторазового використання. Одним із перспективних рішень є іммобілізація клітин на природних носіях. Особливу увагу привертають альгінати, які формують стабільну гелеву матрицю з високою сорбційною ємністю. Вони не лише захищають іммобілізовані ціанобактерії від токсичного стресу, а й забезпечують подвійний механізм вилучення металів: за рахунок іонобмінної сорбції самим альгінатним гелем та подальшої біоакумуляції живими клітинами. Як екологічно безпечні природні полімери, альгінати створюють оптимальні умови для клітин, підтримуючи їхню життєздатність, метаболізм і фотосинтетичну активність протягом тривалого часу.

Отже, метою даного дослідження була оцінка ефективності вилучення іонів купруму з водного середовища за допомогою іммобілізованих в альгінатний гель клітин ціанобактерії *Nostoc commune.*

Матеріали та методи Об'єктом дослідження були альгологічно чисті культури ціанобактерій *Nostoc commune* (Vaucher) Bornet & Flahault з колекції кафедри біохімії та біотехнології Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Культури вирощували на середовищі Фітцджеральда (Gerloff et al., 1950) у кліматичній шафі за температури 22 ± 2 °C, відносної вологості повітря 85 %, 16-годинного фотоперіоду та освітленості 2,5 тис. лк за використання холодного білого світла.

Перед початком експерименту культуру *N. commune* стандартизували за кількістю клітин, встановлюючи початкову концентрацію на рівні 1×10^6 кл/мл. Для іммобілізації відбирали об'єм стандартизованої культури, що відповідав об'єму розчину альгінату натрію, призначеного для приготування альгінатних кульок. Культуру центрифугували, після чого надосадову рідину видаляли, а отриману клітинну біомасу використовували для іммобілізації.

Іммобілізацію клітин проводили за методом Moreno-Garrido (Moreno-Garrido, 2013), розробленим на основі підходу Hertzberg і Jensen. Клітинну біомасу змішували з 1,5% розчином альгінату натрію до отримання однорідної суміші. Отриманий розчин краплями вносили в розчин хлориду кальцію для формування альгінатних кульок. Сформовані кульки витримували в розчині 4 % $CaCl_2$ протягом 30 хв, після чого промивали водою для видалення надлишку солі та переносили у свіже середовище Фітцджеральда.

Для дослідження впливу купруму сформували дві експериментальні групи: вільні клітини *N. commune* та клітини, іммобілізовані в альгінаті натрію. Об'єм кожної культуральної проби становив 50 мл. В іммобілізованих варіантах досліду альгінатні кульки становили 20 % загального об'єму проби, а решту об'єму займало культуральне середовище. Кожну експериментальну групу поділили на шість підгруп: контрольну, без додавання купруму та п'ять дослідних, у яких концентрації купруму відповідали 1, 5, 10, 50 і 100 гранично допустимим (ГДК) відповідно до норм для водойм рибогосподарського призначення (1 ГДК -1 мкг/л іону купруму) (Mussakulkyzy et al., 2025). Для створення заданих концентрацій використовували нітрат купруму.

Експеримент тривав 15 діб. Проби відбирали кожні три доби. Для аналізу іммобілізованих клітин альгінатні кульки розчиняли в натрій-цитратному буфері. З отриманої суспензії відбирали аліквоту для визначення загальної кількості клітин та їхньої життєздатності. Решту суспензії центрифугували для відокремлення клітинної біомаси від розчиненої альгінатної

матриці. Вміст міді в культуральному середовищі та надосадовій рідині після розчинення альгінатної матриці визначали методом атомно-абсорбційної спектрометрії на приладі С-115М1. Загальну кількість клітин *N. commune* визначали шляхом підрахунку в камері Фукса-Розенталя (de Queiroz et al., 2012). Життєздатність клітин визначали мікроскопічно методом диференційного забарвлення з використанням нейтрального червоного та метиленового синього у співвідношенні 5000:1 відповідно.

Отримані результати виражали у вигляді середнього арифметичного значення та його стандартного відхилення (M±SD). Статистичну обробку даних проводили за методом дисперсійного аналізу (ANOVA) із застосуванням критичного рівня значущості $p \leq 0.05$. За наявності статистично значущих відмінностей додатково застосовували критерій Тьюкі (Tukey's HSD) для виявлення міжгрупових парних відмінностей

Результати та їх обговорення. Купрум належить до категорії біогенних екотоксикантів із вираженим подвійним характером біологічної дії на гідробіонти. З одного боку, іони купруму є незамінними мікроелементами, необхідними для нормального перебігу метаболічних процесів, зокрема забезпечують роботу ряду ферментів (цитохромоксидази, супероксиддисмутази) та підтримання окисно-відновного гомеостазу клітини. З іншого боку, інтервал між фізіологічно необхідною та токсичною концентрацією міді у водному середовищі є надзвичайно вузьким. При перевищенні гранично допустимих рівнів купрум виявляє альгіцидну та цитотоксичну дію: ініціює вільнорадикальне окиснення ліпідів мембран, пригнічує фотосинтетичну активність (Pandey at al., 2022). Важливою біотехнологічною перевагою представників роду *Nostoc* є їхня порівняна толерантність до іонів купруму, що дозволяє їм зберігати функціональну активність за умов метал-індукованого стресу. Зокрема, було показано, що *Nostoc linckia* накопичувала мідь та інші метали з полікомпонентних систем. Її накопичувальна здатність зростала впродовж двох–трьох циклів росту біомаси, а стійкість до металів підвищувалася (Cepoi et al., 2022).

Дослідження динаміки чисельності та життєздатності *Nostoc commune* у контрольних умовах (без додавання купруму) продемонструвало суттєві фізіологічні відмінності між вільносуспензійною культурою (К) та клітинами, іммобілізованими у матриксі 1,5 %-го альгінату натрію (К+А) (рис.1).

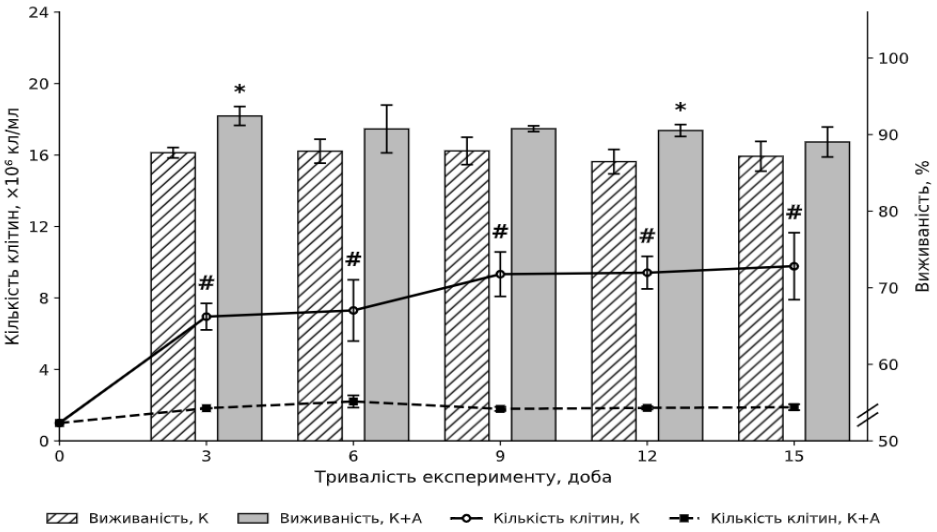


Рис.1 Динаміка чисельності та виживаності клітин Nostoc commune у вільній (К) та іммобілізованій в альгінатний гель (К+А) культурах (M±SD)

*Примітка: * - різниця між досліджуваними групами за показником виживаності клітин є статистично достовірною (p≤0,05); # - різниця за чисельністю клітин є статистично достовірною (p≤0,05)*

Fig. 1. Dynamics of cell abundance and viability of Nostoc commune in free-cell (C) and alginate-immobilized (C+A) cultures (M±SD)

*Note: * - the difference between the experimental groups in cell viability is statistically significant (p≤ 0.05); # - the difference in cell abundance is statistically significant (p≤ 0.05)*

У групі вільноживучих клітин спостерігалася класична S-подібна крива популяційного росту. Вихідна щільність $1{,}0\times10^6$ кл/мл інтенсивно збільшувалася протягом перших 9 діб експерименту, виходячи на стаціонарну фазу плато на рівні $9{,}3 \pm 1{,}24\times10^6$ кл/мл, після чого

чисельність утримувалася в діапазоні 9,4–9,8×10^6 кл/мл до 15-ї доби культивування. Виживаність вільних клітин упродовж усього терміну залишалася стабільною - 85–88%. На противагу цьому, іммобілізація мікроводоростей у альгінатний гідрогель зумовила стримування накопичення сумарної біомаси в середовищі: чисельність клітин у цій групі зберігалася на рівні 1,8–2,2×10^6 кл/мл упродовж усіх 15 діб спостереження. Нижча чисельність клітин у суспензії за іммобілізації може бути пов'язана механічним обмеженням росту всередині полімерної сітки та дифузійним бар'єром, який перешкоджає виходу клітин у навколишнє середовище (Moreno-Garrido, 2008). Водночас частка живих клітин у складі альгінатних гранул була стабільно вищою (89% - 92,4%) порівняно з вільною суспензією, що підтверджує захисну та стабілізувальну роль матриксу. У вільній культурі висока щільність клітин може посилювати конкуренцію за світло та поживні речовини, а також сприяти накопиченню продуктів метаболізму, що потенційно пояснює зниження частки життєздатних клітин.. В іммобілізованій культурі альгінатний матрикс міг забезпечувати стабільніше мікросередовище та частково захищати клітини від механічного впливу, що узгоджується з вищою часткою виживаності культури.

Так, за дії іонів купруму в суспензійній культурі *Nostoc commune* спостерігалося активне наростання загальної чисельності клітин протягом усього експерименту (рис. 2). Однак, збільшення концентрації токсиканту до 100 ГДК призвело до різкого прояву цитотоксичності у вільній культурі: виживаність знижувалася до критичного мінімуму 53 % уже на 3-тю добу культивування (рис. 4).

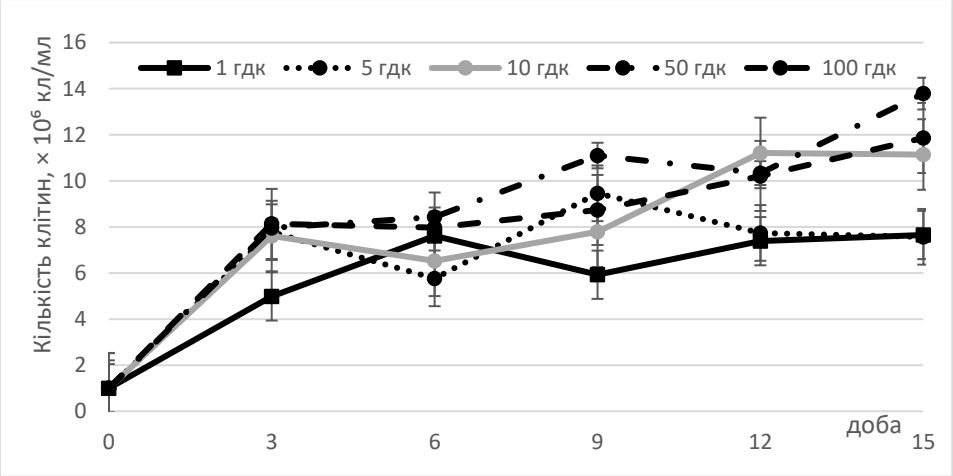


Рис. 2. Динаміка чисельності клітин Nostoc commune у неіммобілізованій культурі за різних концентрацій купруму в середовищі (M±SD)

Fig. 2. Dynamics of Nostoc commune cell abundance in non-immobilized culture at various copper concentrations in the medium

Відомо, що будучи редокс-активним важким металом, катіони Cu^{2+} ініціюють генерацію активних форм кисню за реакціями типу Фентона (Valko et al., 2005), спричиняючи інтенсивне пероксидне окислення ліпідів (ПОЛ) плазмалеми, руйнування її вибіркової проникності та необоротне пригнічення реакційних центрів фотосистеми II (Pandey at al., 2022), що може бути причиною стрімкої загибелі клітин.

Разом із тим, аналіз ростової кінетики виявив популяційний парадокс: незважаючи на зниження виживаності вільних клітин, на 12–15-ту добу у варіантах 50–100 ГДК зафіксовано спалах чисельності до 11–13,8×10^6 кл/мл. Можемо припустити, що різке збільшення кількості клітин пов'язане з механізмом стрес-індукованого компенсаторного гормезису (Geng et al., 2025). Отримані дані вказують на те, що частина ціанобактерій, що вижила, зберігає здатність до проліферації в умовах купрум-індукованого стресу, однак висока токсичність металу призводить до суттєвого зниження життєздатності біомаси.

Іммобілізація ціанобактерій у гранули кальцій-альгінатного гідрогелю радикально змінює описану токсикодинаміку, виступаючи потенційним фізико-хімічним та біосорбційним бар'єром (рис. 3).

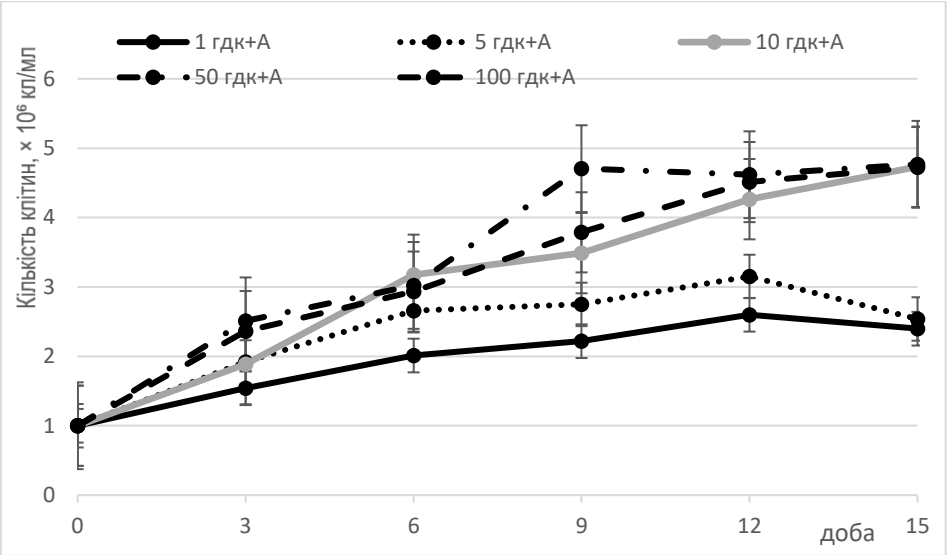


Рис. 3 Динаміка чисельності клітин Nostoc commune, іммобілізованих в альгінатний гель, за різних концентрацій купруму в середовищі (M±SD)

Fig. 3. Dynamics of Nostoc commune cell abundance immobilized in alginate gel at various copper concentrations in the medium (M±SD)

Аналіз життєздатності іммобілізованих клітин (рис. 5) виявив їхню високу захищеність на початкових етапах експерименту: на 3-тю добу за умов критичного забруднення (100 ГДК+А) виживаність N. commune становила 77% проти 53% у вільносуспензійній культурі, причому ефективність захисної дії матриці до 9-ї доби культивування була однаково високою у всіх групах іммобілізованого ностоку. Хімічна природа цієї протекції пов'язана зі специфікою будови зшитого кальцієм альгінатного матриксу (Lee et al., 2012). Завдяки взаємодії катіонів міді з функціональними групами альгінату може відбуватися іонообмінна сорбція за участю іонів кальцію та міді ($Ca^{2+} \leftrightarrow Cu^{2+}$) і координаційне зв'язування (Wang at al., 2019). Затримуючи частину токсиканта в полімерному матриксі гранул, альгінатний гідрогель потенційно знижує концентрацію біодоступних іонів Cu^{2+} у безпосередньому мікросередовищі клітин, захищаючи їх від надмірного токсичного впливу. Завдяки цьому іммобілізовані ціанобактерії могли зазнавати менш вираженого токсичного впливу. Наслідком цього стало утримання чисельності клітин у середовищі довкола гранул у нижчих межах: у групі 100 ГДК + А чисельність клітин на 15-ту добу не перевищувала $4,7 \times 10^6$ кл/мл (рис. 3).

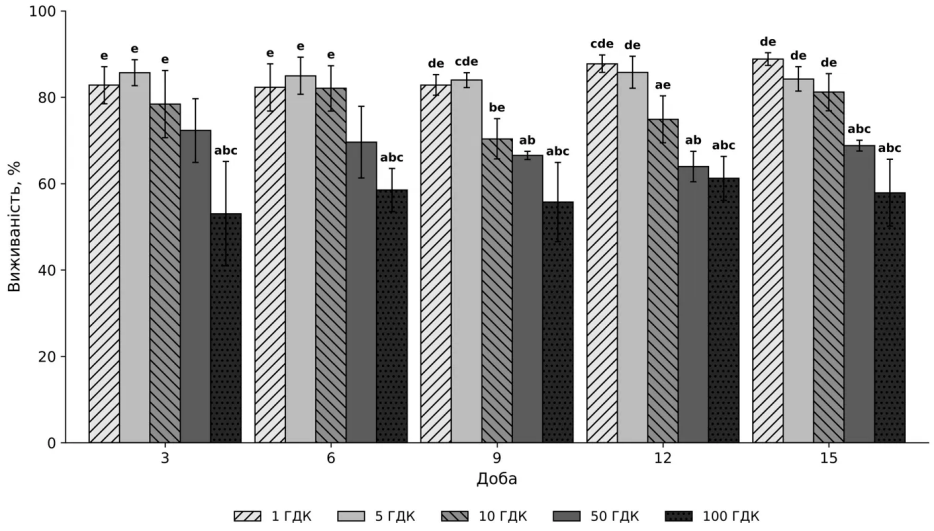


Рис. 4. Динаміка виживаності клітин Nostoc commune у неіммобілізованій культурі за різних концентрацій купруму в середовищі (M±SD)

Примітка: a - достовірна різниця з групою 1 ГДК; b – 5 ГДК; c - 10 ГДК; d - 50 ГДК; e – 100 ГДК. (p≤0,05)

Fig. 4. Dynamics of Nostoc commune cell viability in non-immobilized culture at various copper concentrations in the medium (M±SD)

Note: a - significant difference from the group 1 MPC; b -5 MPC; c - 10 MPC; d - 50 MPC; e - 100 MPC. (p≤0.05)

Разом із тим, збільшення тривалості експозиції за високої концентрації токсиканта (100 ГДК + А) супроводжувалося поступовим зниженням виживаності іммобілізованих клітин, що може бути зумовлено поступовим зменшенням ефективності сорбції матриксом (Mahl at al., 2023). Показано, що у міру тривалого контакту з розчином частина сорбційних центрів на поверхні гранули може насичуватися іонами металів, після чого незв'язані катіони дифундують крізь пори гідрогелю вглиб матриксу (Wang at al., 2019).

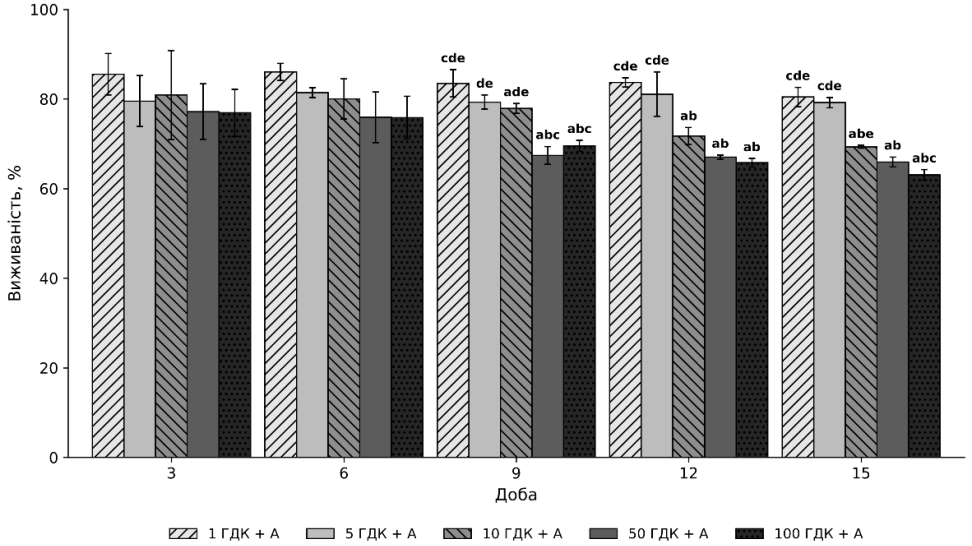


Рис. 5. Динаміка виживаності клітин Nostoc commune, іммобілізованих в альгінатний гель, за різних концентрацій купруму в середовищі (M±SD)

Примітка: a - достовірна різниця з групою 1 ГДК+А; b – 5 ГДК+А; c - 10 ГДК+А; d - 50 ГДК+А; e – 100 ГДК+А. (p≤0,05)

Fig. 5. Dynamics of Nostoc commune cell viability immobilized in alginate gel at various copper concentrations in the medium (M±SD)

Note: a - significant difference from the group 1 MPC+A; b -5 MPC+A; c - 10 MPC+A; d - 50 MPC+A; e - 100 MPC+A (p≤0.05)

Аналіз динаміки залишкового вмісту купруму в середовищі засвідчив високу ефективність деконтамінації як суспензійною, так і іммобілізованою культурами *Nostoc commune* (рис. 6). Вже на 3-тю добу експерименту спостерігалося суттєве зниження концентрації іонів купруму за всіх досліджуваних концентрацій(1–100 ГДК). Іммобілізована в альгінатний гель культура виявила більш виражену динаміку вилучення купруму на початкових етапах та досягала нижчих рівнів залишкового вмісту металу наприкінці експерименту. Зокрема, за умов 5 ГДК залишковий вміст купруму на 15-ту добу знизився до близько 30%, тоді як у суспензійній культурі цей показник становив 59,40%. В усіх досліджуваних концентраціях (1–100 ГДК) іммобілізовані в альгінат гранули забезпечували стабільне зв'язування металу, знижуючи його рівень у середовищі до 30–60% від початкового залежно від дози та терміну культивування. Навіть за найвищого токсичного навантаження (100 ГДК) іммобілізована система забезпечувала вилучення понад 50% іонів купруму. Загалом, максимальна ефективність очищення середовища іммобілізованою культурою фіксувалася в діапазоні 5–10 ГДК, що підтверджує синергічний ефект сорбційного потенціалу альгінатного матриксу та біоакумуляційної здатності клітин ціанобактерій.

Співставлення ростових характеристик *Nostoc commune* та ефективності вилучення Купруму дозволяє стверджувати, що іммобілізована культура є суттєво ефективнішою у розрахунку на одиницю біомаси та чисельність клітин. Незважаючи на те, що в альгінатних гранулах спостерігаються нижчі показники загальної чисельності клітин та приросту біомаси, відсоток деконтамінації середовища залишається стабільно високим і співвідносним з вільною суспензією. Отримані дані свідчать про те, що іммобілізована система демонструє значно вищу питому сорбційну ємність. Оскільки високий рівень вилучення міді досягається за умови суттєво меншого наростання біомаси, основним чинником зв'язування на початкових етапах виступає сорбційний потенціал самого альгінатного носія з подальшою внутрішньоклітинною біоакумуляцією. Це становить важливу технологічну перевагу, оскільки дозволяє досягати високого рівня деконтамінації води без необхідності подальшої утилізації значних об'ємів відпрацьованої надлишкової біомаси.

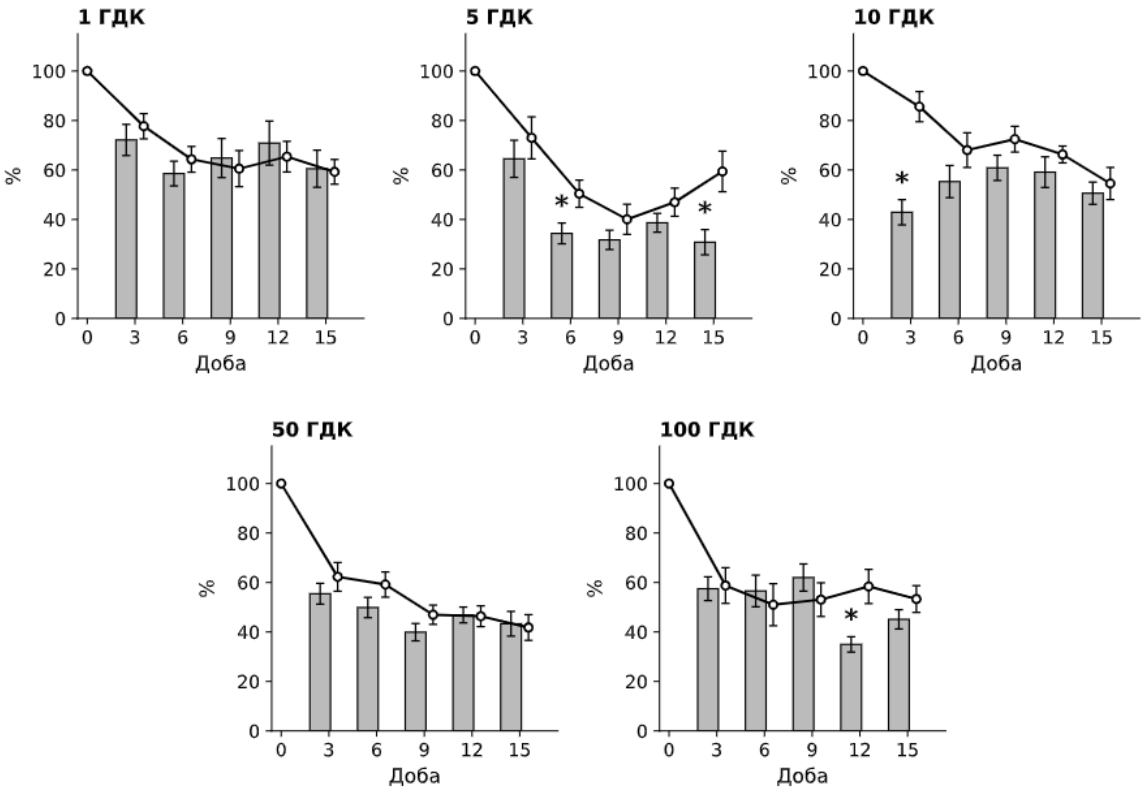


Рис. 6. Динаміка залишкового вмісту іонів купруму у середовищі з Nostoc commune у суспензійній та іммобілізованій в альгінатний гель формах

Примітка: стовпці — культура Nostoc commune, іммобілізована в альгінатний гель; суцільна лінія — суспензійна (неіммобілізована) культура. Дані наведено у відсотках (%) від початкового вмісту іонів купруму середовищі. ∗ — різниця між значеннями суспензійної та іммобілізованої культур є статистично достовірною (p≤0,05)

Fig. 6. Dynamics of residual copper ion content in the medium with Nostoc commune in suspension and alginate-immobilized forms

Note: bars represent Nostoc commune culture immobilized in alginate gel; solid line represents suspension (non-immobilized) culture. Data are presented as a percentage (%) of the initial copper ion content in the medium. ∗ — the difference between the suspension and immobilized culture values is statistically significant (p≤0,05)

Висновки. Іммобілізація *Nostoc commune* в альгінатний гель суттєво змінює ростову й фізіологічну реакцію ціанобактерій на дію іонів купруму. Попри те, що гелевий носій стримує інтенсивність проліферації клітин, альгінатна структура забезпечує стабільно високий рівень їхньої життєздатності та екранує клітини від стресового впливу важкого металу, підтримуючи високу виживаність за умов, де у суспензійній культурі спостерігається масова загибель біомаси. Оцінка динаміки вилучення Купруму підтвердила високу біоремедіаційну ефективність іммобілізованої системи, яка забезпечує глибоке очищення середовища, досягаючи максимальних показників деконтамінації за помірного металевого навантаження (5 ГДК). Зіставлення низького приросту біомаси зі стабільно високими показниками вилучення купруму доводить, що іммобілізовані клітини *Nostoc commune* володіють значно вищою питомою сорбційною ємністю на одиницю біомаси завдяки синергії первинної фізико-хімічної сорбції матриксом та подальшої біоакумуляції.

Конфлікт інтересів. *Автори заявляють, що дослідження проводилося за відсутності будь-яких комерційних або фінансових відносин, які можна було б витлумачити як потенційний конфлікт інтересів.*

Фінансування. *Дослідження виконано за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України (№ 0125U001564).*

Список літератури / References:

1. Cepoi, L., Zinicovscaia, I., Valuta, A., Codreanu, L., Rudi, L., Chiriac, T., Yushin, N., Grozdov, D., & Peshkova, A. (2022). Peculiarities of the edaphic cyanobacterium Nostoc linckia culture response and heavy metal accumulation from copper-containing multimetal systems. Toxics, 10(3), Article 113. https://doi.org/10.3390/toxics10030113
2. Cheban, L. M., et al. (2020). Obtaining phycobiliprotein-containing Nostoc linckia (Roth.) Born. et Flah

biomass via bioconversion of waste water from recirculating aquaculture systems (RAS). Nova Biotechnologica et Chimica, 19(2), 240–247. https://doi.org/10.36547/nbc.v19i2.592
3. Queiroz, J. C., de Melo Ferreira, A. C., & da Costa, A. C. A. (2012). The growth of Monoraphidium sp. and Scenedesmus sp. cells in the presence of thorium. The Scientific World Journal, 2012, Article 592721. https://doi.org/10.1100/2012/592721
4. Geng, C., Zhou, B., Calabrese, E. J., & Agathokleous, E. (2025). Stimulation of Microcystis aeruginosa by subtoxic concentrations of contaminants: A meta-analysis. Environmental Research, 271, Article 121105. https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121105
5. Gerloff, G. C., Fitzgerald, G. P., & Skoog, F. (1950). The isolation, purification, and culture of blue-green algae. American Journal of Botany, 37(3), 216–218. https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1950.tb12184.x
6. Lee, K. Y., & Mooney, D. J. (2012). Alginate: Properties and biomedical applications. Progress in Polymer Science, 37(1), 106–126. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.06.003
7. Lourembam, J., Haobam, B., Singh, K. B., Verma, S., & Rajan, J. P. (2024). The molecular insights of cyanobacterial bioremediations of heavy metals: The current and the future challenges. Frontiers in Microbiology, 15, Article 1450992. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1450992
8. Mahl, C. R. A., Bataglioli, R. A., Calais, G. B., Taketa, T. B., & Beppu, M. M. (2022). Role of alginate composition on copper ion uptake in the presence of histidine or beta-amyloid. Molecules, 27(23), Article 8334. https://doi.org/10.3390/molecules27238334
9. Moreno-Garrido, I. (2008). Microalgae immobilization: Current techniques and uses. Bioresource Technology, 99(10), 3949–3964. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.040
10. Moreno-Garrido, I. (2013). Microalgal immobilization methods. In J. M. Guisan (Ed.), Immobilization of enzymes and cells (Methods in Molecular Biology, Vol. 1051, pp. 327–347). Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-62703-550-7_22
11. Mussakulkyzy, A., Opp, C., Amirgaliev, N., Madibekov, A., Ismukhanova, L., & Zhadi, A. (2025). Transmission of heavy metals in river water and self-purification capacity of Ile River. Applied Sciences, 15(12), Article 6548. https://doi.org/10.3390/app15126548
12. Oder, J. C., Sateles, T. E., de Souza, L. B., Nunes-Nesi, A., Araújo, W. L., & Alvarenga-Lucius, L. (2025). Metabolic responses, uptake, and export of copper in cyanobacteria. Biology, 14(7), Article 798. https://doi.org/10.3390/biology14070798
13. Pandey, N., Patel, A., Tiwari, S., & Prasad, S. M. (2022). Differential response of copper nanoparticles and ionic copper on growth, chlorophyll fluorescence, oxidative stress, and antioxidant machinery of two paddy field cyanobacteria. Ecotoxicology, 31(6), 933–947. https://doi.org/10.1007/s10646-022-02553-3
14. Shybanova, A., Ruda, M., & Paslavskyi, M. (2025). Impact of active military actions on the ecological state of soil and water resources in southern Ukraine. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 351(3), 579–584. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-75
15. United Nations Environment Programme. (2022). The environmental impact of the conflict in Ukraine: A preliminary review. https://www.unep.org/resources/report/environmental-impactconflict-ukraine-preliminary-review
16. Valko, M., Morris, H., & Cronin, M. T. D. (2005). Metals, toxicity and oxidative stress. Current Medicinal Chemistry, 12(10), 1161–1208. https://doi.org/10.2174/0929867053764635
17. Wang, B., Wan, Y., Zheng, Y., Lee, X., Liu, T., Yu, Z., Huang, J., Ok, Y. S., Chen, J., & Gao, B. (2019). Alginate-based composites for environmental applications: A critical review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 49(4), 318–356. https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1547621
18. Yashchenko, L., Androshchuk, O., Vasylenko, L., & Chornoivan, Y. (2025). Environmental risks of heavy metal pollution in war-affected soils in Ukraine. European Journal of Environmental Sciences, 15(1), 18–27. https://doi.org/10.14712/23361964.2025.3

EFFECT OF ALGINATE IMMOBILIZATION OF *NOSTOC COMMUNE* ON THE KINETICS OF COPPER ION REMOVAL FROM AQUEOUS SOLUTIONS

L.V. Khuda, L.V. Humeniuk

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
Kotsiubynsky 2 Str., Chernivtsi 58012, Ukraine
l.khuda@chnu.edu.ua, humeniuk.liliana@chnu.edu.ua

Increasing technogenic and military pressure on aquatic ecosystems in Ukraine, caused by combat operations, ammunition explosions, and the destruction of industrial infrastructure, creates an urgent need to develop and improve biotechnological approaches for water purification from heavy metals. Among military pollutants, copper occupies a specific position, as its high concentrations exert pronounced algicidal and cytotoxic effects on aquatic organisms. This study presents a comparative evaluation of copper ion removal efficiency from aqueous media using free-suspension and 1.5% alginate gel-immobilized cultures of the cyanobacterium Nostoc commune across a wide range of toxic loads (1–100 MAC) over a 15-day period. It was established that the immobilization of Nostoc cells within the alginate matrix

restricts their proliferation rate (cell counts ranged within (1,8–2,2 ×10^6 cells/mL compared to 9,4–9,8 ×10^6 cells/mL in suspension), which is attributed to mechanical constraints and a diffusion barrier. However, the gel carrier maintains a consistently high cell viability level (77–92.4%) and effectively screens cyanobacteria from copper-induced stress during the initial cultivation phases. In contrast, the suspension culture under 100 MAC exhibited rapid cell mortality (viability dropped to 53% on day 3), followed by a population surge on days 12–15 due to a compensatory effect. Evaluation of copper removal dynamics via atomic absorption spectrometry confirmed the high decontamination capacity of both N. commune forms. Nevertheless, the immobilized system demonstrated a distinct advantage in the early stages, achieving maximum medium purification (residual copper content of approximately 30%) under 5 MAC on day 15. Coupling reduced biomass accumulation with consistently high metal-binding efficiency proves that immobilized N. commune cells possess a significantly higher specific sorption capacity per unit of biomass. High bioremediation efficiency is sustained by the synergy of initial ion-exchange sorption onto the alginate matrix and subsequent intracellular bioaccumulation. These findings confirm the strong potential of alginate-based N. commune formulations for deep water purification without generating substantial volumes of spent excess biomass.

Keywords: Nostoc commune, copper, immobilization, alginate gel, bioremediation, biosorption, bioaccumulation, heavy metals

Отримано редколегією 28.08.2026 р.
Підписано до друку 15.10.2026 р.
Дата публікації 31.10.2026 р.

ORCID ID
Лідія Худа: https://orcid.org/0000-0002-1098-7537