

ЕКОЛОГІЧНА ФІЗІОЛОГІЯ І БІОХІМІЯ ВОДНИХ РОСЛИН

УДК 574.64:581.526.3

О.О. ПАСІЧНА, к. б. н., ст. наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна,
e-mail: ecorasichna@gmail.com
ORCID 0009-0008-4297-5291

П.Д. КЛОЧЕНКО, д. б. н., проф., завідувач відділу,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: pklochenko@ukr.net
ORCID 0000-0003-4886-6746

Г.В. ХАРЧЕНКО, к. б. н., наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
ORCID 0000-0002-6102-2129

М.О. ПЛАТОНОВ, к. б. н., наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Героїв Сталінграда, 12, Київ, 04210, Україна,
e-mail: n.platonov73@gmail.com
ORCID 0009-0008-4075-4604

О.О. ГОДЛЕВСЬКА, к. фіз.-мат. н., доцент,
Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна
e-mail: godlevok@gmail.com
ORCID 0000-0001-9446-1112

ОСОБЛИВОСТІ АКУМУЛЯЦІЇ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ЗЕЛЕНИМИ НИТЧАСТИМИ ВОДОРОСТЯМИ У ВОДОЙМАХ З РІЗНИМ СТУПЕНЕМ АНТРОПОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ

Показано, що макроскопічні зелені нитчасті водорості Spirogyra sp. та Oedogonium sp. зі ставків НПП «Голосіївський» (Україна) накопичують і концентрують значну кількість важких металів (Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Co) з водного середовища, призводячи до його очищення та детоксикації. Встановлено високі значення коефіцієнтів біологічного накопичення металів водоростями, які становлять від сотень і тисяч (для Zn, Co, Cr, Cu, Ni, Pb) до десятків тисяч (для Fe і Mn). За величиною коефіцієнтів накопичення у водоростях досліджувані метали розташовано у ряду: Fe > Mn > Zn > Ni, Co > Cu, Pb, Cr.

Ц и т у в а н н я: Пасічна О.О., Клоченко П.Д., Харченко Г.В., Платонов М.О., Годлевська О.О. Особливості акумуляції важких металів зеленими нитчастими водоростями у водоймах з різним ступенем антропогенного забруднення. *Гідробіол. журн.* 2026. Т. 62, № 2. С. 56—68.

Встановлено значний рівень зв'язку між вмістом важких металів у нитчастих водоростях *Spirogyra* sp. та *Oedogonium* sp. і концентрацією розчинної форми металів у воді ставків НПП «Голосіївський», що дозволяє рекомендувати ці види для використання як біомоніторів забруднення водойм важкими металами.

Ключові слова: зелені нитчасті водорості, важкі метали, акумуляція, біомоніторинг, ставки, Національний природний парк «Голосіївський»

Зростання темпів урбанізації та індустріалізації призвело до збільшення забруднення водойм речовинами різної хімічної природи, зокрема важкими металами, яке на сьогодні стало серйозною екологічною проблемою. Це пов'язано з тим, що, потрапляючи у водні екосистеми, важкі метали зумовлюють як хронічний, так і гострий токсичний вплив на морську та прісноводну біоту [7]. Важкі метали характеризуються стійкістю, нездатністю до біологічного розкладання, значним біоаккумуляційним потенціалом і високою токсичністю, основними механізмами якої вважають інактивацію ферментів та окиснювальні реакції [4, 13]. Через споживання забрудненої води та харчові ланцюги важкі метали можуть накопичуватися в організмі людини та призводити до різноманітних токсичних, включно з мутагенними і канцерогенними, ефектів та серйозного погіршення здоров'я [19, 26].

Для видалення важких металів із води застосовують різні хімічні методи, зокрема електролітичні технології, йонний обмін, осадження, хімічну екстракцію, гідроліз, полімерну мікрокапсуляцію та вилуговування. Однак більшість з цих підходів є дорогими для застосування у великих масштабах, а також вимагають виснажливого контролю та постійного моніторингу [26]. Крім того, зазначені методи мають певні обмеження у використанні внаслідок утворення вторинних забруднюючих речовин, зокрема у вигляді осаду, а також значну потребу в енергії та хімікатах. Також вони є економічно неефективними при низьких концентраціях металів у водному середовищі [29].

У зв'язку з цим для відновлення забрудненого важкими металами водного середовища перевагу надають більш екологічно чистим та ефективним методам біоремедіації [22, 26, 28, 29]. Зокрема, альтернативою існуючим хімічним технологіям видалення важких металів з води є біосорбція, насамперед завдяки доступній і недорогій сировині та високій ефективності при низькій собівартості [6]. Використання водоростей як біосорбенту на сьогодні вважається перспективним, екологічно чистим та економічно вигідним способом видалення важких металів з природних та стічних вод [9, 16, 26, 29]. Цьому також сприяє наявність значної біомаси водоростей у прісноводних та морських водоймах [16, 29].

Доведено, що біосорбція та біоаккумуляція — це основні механізми, які лежать в основі накопичення водоростями металів з водного середовища [26]. Це складні процеси, які включають йонний обмін, комплексоутворення та інактивацію металів в організмі водоростей [13].

В експериментальних умовах встановлено, що зелені нитчасті водорості *Cladophora* sp., *Oedogonium* sp., *Spirogyra* sp. ефективно накопичу-

ють і видаляють метали з водних розчинів [11, 12, 20]. При цьому доведено, що на здатність водоростей до біосорбції та біоаккумуляції металів впливає низка чинників, таких як біомаса, рН, тривалість впливу металу, температура, взаємодія йонів при поглинанні, а також їхня концентрація у водному середовищі [16, 20].

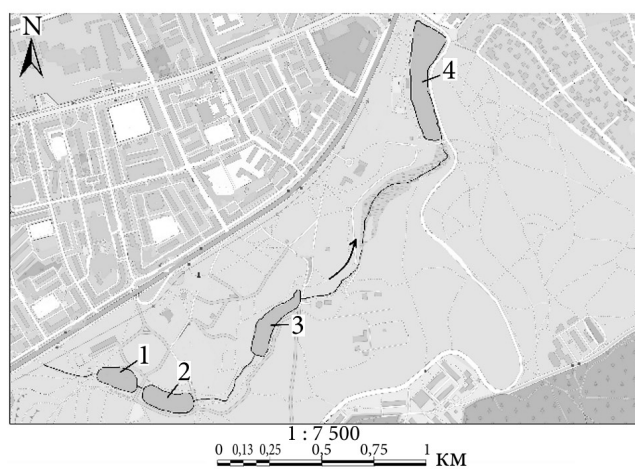
Дослідження акумуляційної здатності водоростей у природних умовах показало, що деякі види зелених нитчастих водоростей, серед інших *Enteromorpha intestinalis* (Linnaeus) Nees, *Cladophora glomerata* (Linnaeus) Kutzing, *Microspora quadrata* Hazen, можуть використовуватись як біоіндикатори забруднення важкими металами водойм, які зазнають антропогенного впливу, зокрема внаслідок надходження в них забруднених промислових, побутових чи сільськогосподарських стічних вод, та сприяти видаленню важких металів [5, 8]. Отже, дослідження акумуляційної здатності водоростей у природних умовах є достатньо актуальними, оскільки дають можливість відібрати ті види, які можуть бути рекомендовані для біоіндикації та біомоніторингу забруднення водного середовища важкими металами. З огляду на це метою нашої роботи було визначення рівня накопичення металів зеленими нитчастими водоростями з природних водойм, які відрізняються ступенем антропогенного забруднення.

Матеріал і методика досліджень

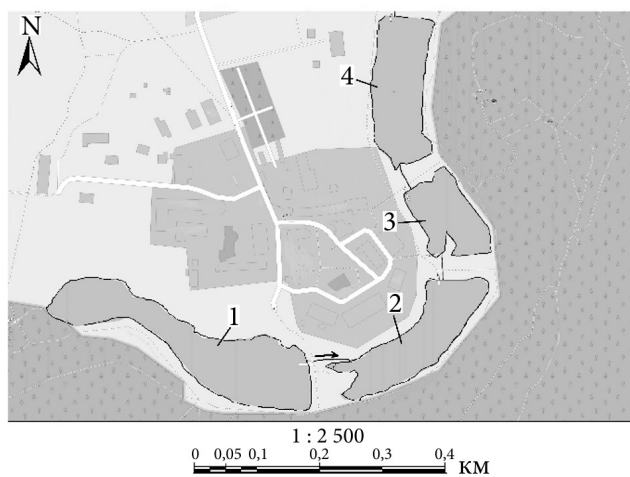
Об'єктами досліджень були широко розповсюджені у водоймах м. Києва макроскопічні зелені нитчасті водорості *Spirogyra* sp. та *Oedogonium* sp. Відбір їхньої біомаси та проб води проводили влітку 2023 р. зі ставків, що розташовані на території Національного природного парку «Голосіївський» (м. Київ, Україна). Вони формують три каскади з чотирьох сполучених між собою штучно створених водойм кожен, відомих як Горіховатські, Китаївські та Дідорівські ставки (рис. 1), які характеризуються різним ступенем антропогенного забруднення [10]. У Горіховатських та Дідорівських ставках були відібрані водорості *Spirogyra* sp., у Китаївських — *Oedogonium* sp.

У лабораторних умовах зразки водоростей промивали дистильованою водою для видалення бруду і поміщали на фільтрувальний папір для зменшення вмісту води. Потім біомасу водоростей висушували до повітряно-сухої маси в кімнатних умовах при температурі 28 ± 4 °C без потрапляння прямих сонячних променів та з достатньою вентиляцією. Перед взяттям наважок рослинний матеріал досушували протягом 8 год при 70 °C у сушильній шафі та подрібнювали до порошкоподібного стану. Для кислотного озолення (концентрованою азотною кислотою) рослинного матеріалу використовували мікрохвильову (НВЧ) піч MWS-2 (Berghoff, Німеччина) [3].

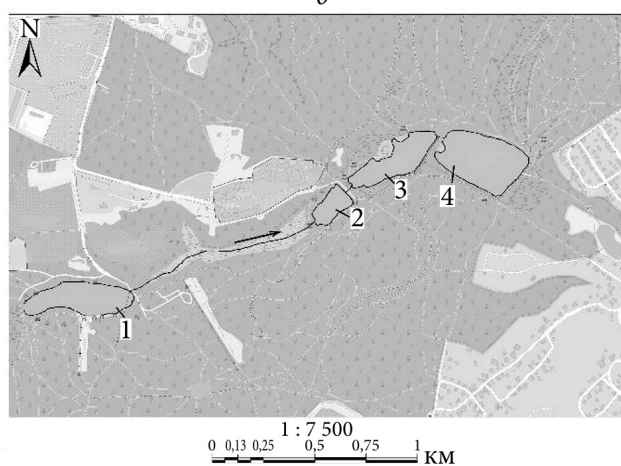
Відібрані проби води зберігали і транспортували у поліпропіленових ємностях. Для визначення металів у розчиненій формі ($Fe_{розч}$, $Mn_{розч}$, $Zn_{розч}$, $Cu_{розч}$, $Pb_{розч}$, $Ni_{розч}$, $Co_{розч}$, $Cr_{розч}$) відібрану воду фільтрували через нітроцелюлозні мембранні фільтри Fioroni (КНП) з діаметром пор



a



б



в

Рис. 1. Карта-схема ставків Національного природного парку «Голосіївський»: *a* — Горіховатські; *б* — Китаївські; *в* — Дідорівські; цифрами позначено номери водойм
ISSN 0375-8990. Гідробіологічний журнал. 2026. 62(2)

0,45 мкм, потім підкисляли концентрованою азотною кислотою (з розрахунку 12 см³ кислоти на 1 дм³ води) [2].

Визначення вмісту важких металів (Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Ni, Co, Cr) в озолоному рослинному матеріалі та концентрації розчинної форми металів у воді проводили методом оптичної емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою на оптичному емісійному спектрометрі iCAP 6300 Duo (Thermo-Fisher Corporation, США) [3].

Коефіцієнти біологічного накопичення металів (КБН) для водоростей визначали як співвідношення: вміст металу в рослинному матеріалі (мг/кг сухої маси)/концентрація металу у воді (мг/дм³) [19].

Статистичну обробку одержаних даних (розрахунок середнього значення та стандартного відхилення ($M \pm m$) з 3—4 визначень, а також коефіцієнтів кореляції Пірсона) проводили за допомогою програми MS Excel 2016.

Результати досліджень та їх обговорення

Зелені нитчасті водорості широко розповсюджені у прісноводних водоймах та характеризуються інтенсивним ростом і значною поглинальною здатністю щодо біогенних речовин, мікро- і макроелементів [1]. Доведено, що завдяки своїм морфолого-фізіологічним характеристикам, зокрема наявності центральної вакуолі та її участі в забезпеченні високої інтенсивності мінерального живлення, а також значній асиміляційній поверхні, зелені нитчасті водорості здатні накопичувати і видаляти з водного середовища значну кількість важких металів, таким чином сприяючи його очищенню, що робить можливим їх використання у біоремедіаційних технологіях [1, 8, 15 та ін.].

Дослідження щодо накопичення металів (Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Co) зеленими нитчастими водоростями *Spirogyra* sp. та *Oedogonium* sp. зі ставків НПП «Голосіївський» виявили, що вміст акумульованих металів був різний у зразках, зібраних з водойм, які характеризуються різним ступенем антропогенного забруднення (рис. 2). Про це свідчить, зокрема, той факт, що нитчасті водорості, зібрані з Горіховатських ставків, накопичували цинку (93,4—148,6 мкг/г сухої маси) та купруму (17,0—31,2 мкг/г сухої маси) більше, ніж водорості з Дідорівських (відповідно 22,1—71,0 і 6,4—14,6 мкг/г сухої маси) та Китаївських ставків (відповідно 10,3—19,1 і 6,0—8,1 мкг/г сухої маси).

Також у нитчастих водоростях з Горіховатських ставків виявлено значний вміст плюмбуму і кобальту, який становив відповідно 4,4—9,3 і 1,4—2,9 мкг/г сухої маси (див. рис. 2). При цьому можна відмітити максимальний вміст Pb у нитчастих водоростях *Spirogyra* sp. з Горіховатського ставка № 1 (9,3 мкг/г сухої маси) і Co — у водоростях *Spirogyra* sp. з Горіховатських ставків № 1 і № 3 (2,2 і 2,9 мкг/г сухої маси). Натомість зелені нитчасті водорості *Spirogyra* sp. та *Oedogonium* sp. з Дідорівських та Китаївських ставків характеризувалися меншим вмістом Pb і Co (відповідно 2,2—6,2 і 0,5—1,8 мкг/г сухої маси та 1,4—2,6 і 0,3—0,9 мкг/г сухої маси).

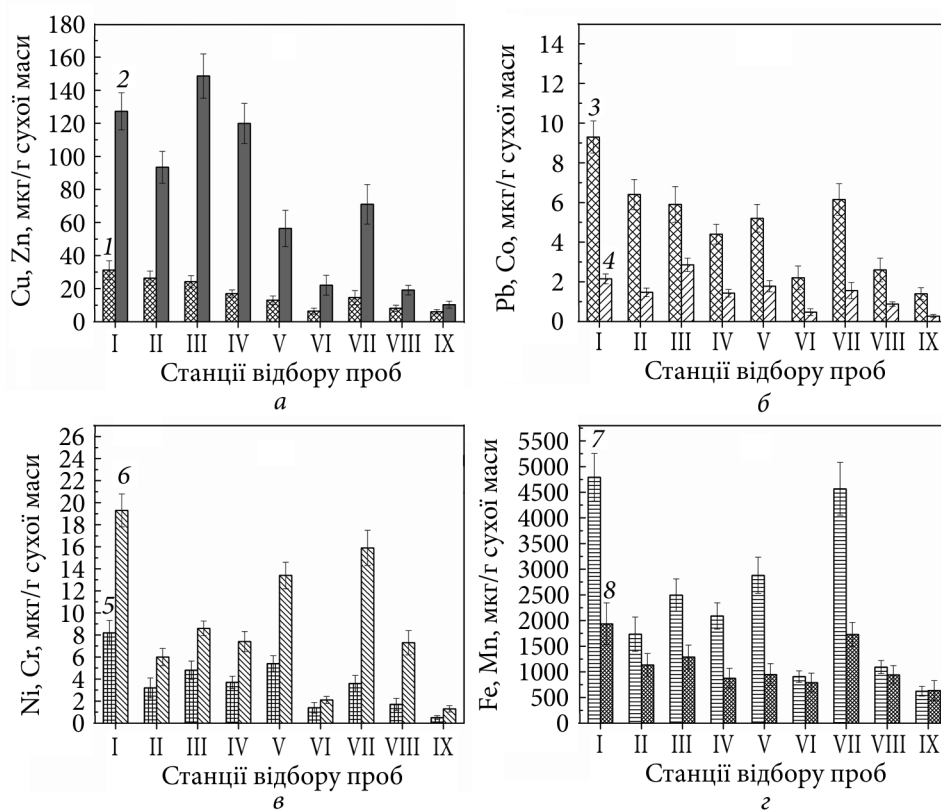


Рис. 2. Вміст важких металів у зелених нитчастих водоростях із ставків НПП «Голосіївський»: а — Cu (1), Zn (2); б — Pb (3), Co (4); в — Ni (5), Cr (6); з — Fe (7), Mn (8). Тут і на рис. 3—4: Горіховатські ставки: I — № 1, II — № 2, III — № 3, IV — № 4; Дідорівські ставки: V — № 1, VI — № 3, VII — № 4; Китаївські ставки: VIII — № 1, IX — № 2. $M \pm m$; $n = 3-4$

Найбільший вміст нікелю та хрому виявлено у нитчастих водоростях *Spirogyra* sp. з Горіховатського ставка № 1 (відповідно 8,2 і 19,3 мкг/г сухої маси, а найменший — у водоростях *Oedogonium* sp. з Китаївського ставка № 2 (0,5 та 1,3 мкг/г сухої маси). Вміст цих металів у водоростях *Spirogyra* sp. та *Oedogonium* sp. з інших досліджуваних водойм знаходився в межах 1,4—5,4 та 2,1—15,9 мкг/г сухої маси, відповідно.

Встановлено, що вміст феруму і мангану досягає максимальних значень у нитчастих водоростях *Spirogyra* sp. з Горіховатського ставка № 1 (відповідно 4793 і 1934 мкг/г сухої маси) та з Дідорівського ставка № 4 (4567 і 1729 мкг/г сухої маси). У досліджених водоростях з інших водойм НПП «Голосіївський» вміст Fe і Mn знаходився в межах 623—3463 та 635—1287 мкг/г сухої маси відповідно (див. рис. 2).

Отже, в результаті проведених досліджень встановлено, що зелені нитчасті водорості *Spirogyra* sp. та *Oedogonium* sp. здатні в значній мірі накопичувати метали з водного середовища. Цьому, очевидно, сприяють

особливості їхньої структури, а саме велика відносна площа поверхні [1]. Однак виявлено, що водорості з Горіховатських ставків у більшості випадків характеризувалися вмістом важких металів у кілька разів більшим, ніж водорості з інших водойм НПП «Голосіївський». Це, ймовірно, пов'язано з більшим забрудненням води Горіховатських ставків важкими металами внаслідок потрапляння в них зливових та комунальних стоків [10].

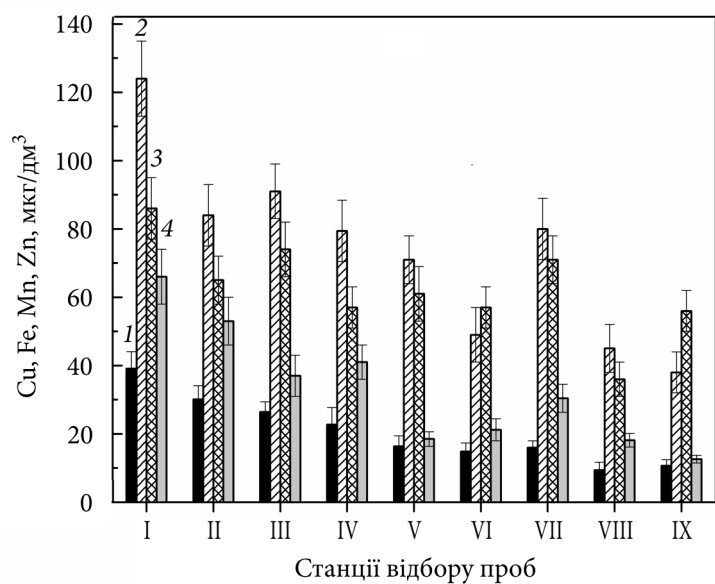
Аналіз вмісту важких металів у зелених нитчастих водоростях з водойм НПП «Голосіївський» показав, що найбільші його значення були для феруму і мангану. Вміст інших досліджуваних металів у водоростях був значно меншим (див. рис. 2). Таким чином, за величиною одержаних значень вмісту у водоростях важкі метали можна розташувати у ряду: $Fe > Mn > Zn > Cu > Cr, Ni, Pb > Co$. Така різниця, вочевидь, пов'язана як з їхнім біологічним значенням, так і з концентрацією у воді. Так, відомо, що такі метали, як Mn, Fe, Zn, Cu, Co, Ni, у мікрокількостях є «мікроелементами», необхідними для росту водоростей. Однак накопичення у водоростях значної кількості цих металів може спричинити стрес і погіршити життєздатність рослинних організмів [18, 21, 24]. Інші метали, зокрема Cd, Pb, Cr та Hg, не мають відомої біологічної ролі і виявляють токсичність навіть у незначних концентраціях [26].

З огляду на те, що біодоступність металів для гідробіонтів, зокрема для водоростей, визначається передусім концентрацією їхньої розчинної форми [17], було проведено визначення концентрацій $Mn_{розч}$, $Fe_{розч}$, $Zn_{розч}$, $Cu_{розч}$, $Pb_{розч}$, $Ni_{розч}$, $Co_{розч}$, $Cr_{розч}$ у воді ставків НПП «Голосіївський». Встановлені концентрації розчинної форми металів у воді досліджуваних водойм влітку (у період активної вегетації водоростей) відображено на рисунку 3.

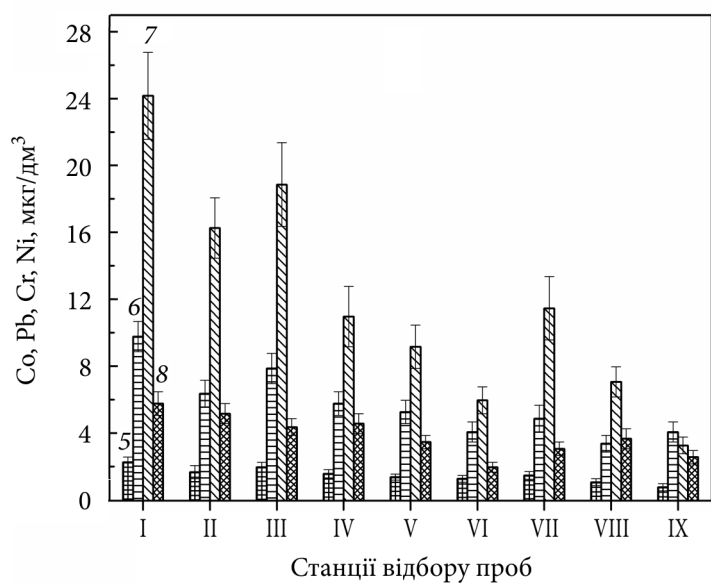
Дослідження концентрацій розчинної (найбільш біологічно доступної) форми металів у воді ставків НПП «Голосіївський» виявило найвищі концентрації Fe і Mn (див. рис. 3). Цей факт, як і встановлена важливість біологічних функцій цих металів (ферум і манган необхідні для перебігу таких процесів життєдіяльності рослинних організмів, як фотосинтез, дихання, синтез ДНК та антиоксидантів [25]), очевидно, і зумовлює найбільше накопичення у водоростях Fe і Mn порівняно з іншими металами.

Доведено, що вміст важких металів у зелених нитчастих водоростях значною мірою корелює з концентраціями розчинної форми металів у воді водойм НПП «Голосіївський». Про це свідчать значення коефіцієнтів кореляції Пірсона (r), які для більшості досліджуваних металів (Fe, Mn, Pb, Zn) знаходяться в межах $0,70 < r < 0,80$, що вказує на високий рівень зв'язку між накопиченням цих металів у водоростях та їхньою концентрацією у воді ставків. Для таких металів, як Cr, Co, Ni, цей показник знаходиться в межах $0,60 < r < 0,70$ (помірний зв'язок), а його максимальне значення ($r = 0,86$) встановлено для Cu.

Високий рівень накопичення металів нитчастими водоростями відображають так звані коефіцієнти біологічного накопичення (рис. 4). Виз-



a



б

Рис. 3. Концентрація розчинної форми важких металів у воді ставків НПП «Голосіївський»: а — Cu (1), Fe (2), Mn (3), Zn (4); б — Co (5), Pb (6), Cr (7), Ni (8)

начення коефіцієнтів накопичення металів водними рослинами дає можливість оцінити їхню біоремедіаційну здатність [19, 23].

Встановлено найбільші значення коефіцієнтів накопичення феруму (більше 30 000) у водоростях *Spirogyra* sp. з Горіховатських ставків № 1, 3, 4 та з Дідорівських ставків № 1 і 4; мангану (більше 20 000) — у водоростях

з Горіховатських ставків № 1 і 3 та з Дідорівського ставка № 4. Вищі значення коефіцієнтів накопичення цинку, купруму і плюмбуму розраховано для зелених нитчастих водоростей *Spirogyra* sp. з Горіховатських ставків № 1, 2, 3 (відповідно у межах 3013—4712, 797—915 і 953—1182); хрому — для водоростей з Горіховатських ставків № 1 і 2 (1460 і 1328); нікелю — для водоростей з Горіховатських ставків № 1 і 3 (1581 і 1426); кобальту — для водоростей з Горіховатських ставків № 2 і 3 (1228 і 1505) (див. рис. 4).

Серед Дідорівських ставків найбільшими величинами значень коефіцієнтів накопичення цинку, купруму, плюмбуму, хрому, нікелю і кобальту характеризувалися нитчасті водорості зі ставків № 1 і 4 (відповідно 2211 і 2005, 563 і 586, 806 і 850, 804 і 373, 990 і 766, 1110 та 1097).

Щодо Китаївських ставків, то найвищі значення коефіцієнтів накопичення більшості досліджуваних металів були встановлені для нитчастих водоростей із ставка № 1 (див. рис. 4).

На основі одержаних результатів можна зробити висновок, що серед досліджуваних металів найбільші значення коефіцієнтів накопичення нитчастими водоростями були характерні для феруму і мангану (десятки тисяч), дещо менші — для цинку (максимальне значення коефіцієнту накопичення Zn у *Spirogyra* sp. з Горіховатського ставка № 1 становило 4712). Коефіцієнти накопичення інших досліджуваних металів (Cu, Co, Cr, Ni, Pb) у зелених нитчастих водоростях *Spirogyra* sp. та *Oedogonium* sp. з водойм НПП «Голосіївський» були меншими (їхні значення знаходились в діапазоні від сотень до тисяч), що, ймовірно, пов'язано як з різною біологічною роллю і рівнем токсичності конкретного металу, так і з його концентрацією у воді (див. рис. 3). За величиною значень коефіцієнтів накопичення у нитчастих водоростях досліджувані метали можна розташувати у ряду: Fe > Mn > Zn > Ni, Co > Cu, Pb, Cr.

Слід зазначити, що коефіцієнти накопичення важких металів нитчастими водоростями за своїми значеннями близькі до коефіцієнтів накопичення металів зануреними вищими водними рослинами [14, 23], що, можливо, пов'язано з деякою подібністю їхньої морфологічної будови, біохімічного складу та фізіологічних функцій [1].

Відомо, що у процесі біоаккумуляції йони важких металів надходять у клітини водоростей через мембрани шляхом активного та пасивного транспорту і накопичуються у клітинах. Надмірне накопичення важких металів всередині клітин викликає пригнічення активності фотосинтезу, а отже, інгібування росту водоростей, руйнування білкових структур, що призводить до порушення цілісності мембрани (необоротне підвищення проникності плазмалеми спричиняє втрату клітиною розчинених речовин), зниження активності ферментів та порушення їхньої структури [25, 26]. Токсичний вплив важких металів призводить до погіршення функціонування системи антиоксидантного захисту клітин і зумовлює окиснювальний стрес, що характеризується надмірним накопиченням активних форм кисню [18]. Активні форми кисню, індуковані важкими металами, викликають перекисне окиснення ліпідів, руйнування мембран, пошкодження ДНК, білків і вуглеводів [27].

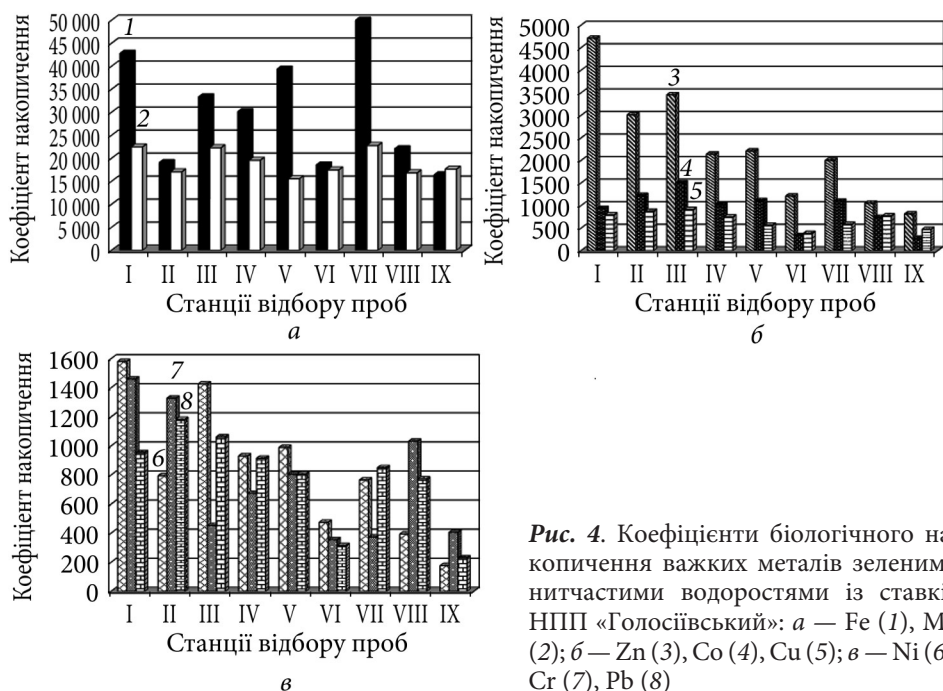


Рис. 4. Коефіцієнти біологічного накопичення важких металів зеленими нитчастими водоростями із ставків НПП «Голосіївський»: а — Fe (1), Mn (2); б — Zn (3), Co (4), Cu (5); в — Ni (6), Cr (7), Pb (8)

Однак, в результаті різноманітних досліджень виявлено, що водні рослини, зокрема водорості, мають механізми захисту від впливу надлишку важких металів, які спрямовані на те, щоб запобігти або принаймні зменшити стрес і пошкодження. Серед них варто зазначити: зменшення поглинання металів та їх виведення з клітин через плазматичну мембрану [19]; зв'язування металів з клітинною стінкою та епібіонтами; іммобілізацію важких металів внаслідок утворення комплексів у вакуолі; синтез сполук, що накопичуються в цитоплазмі і зв'язують метали шляхом утворення комплексів і хелатів (пролін, металотіонеїни, фітохелатини) [27]; активацію антиоксидантної системи, зокрема підвищення активності антиоксидантних ферментів, таких як супероксиддисмутаза, аскорбатпероксидаза, глутатіонпероксидаза і каталаза [18, 25, 27]; збільшення продукції антиоксидантних метаболітів, таких як глутатіон і аскорбат, в органелах і цитоплазмі водоростей [18]. Вважають, що трипептид глутатіон — низькомолекулярний тіол — відіграє головну роль у детоксикації йонів металів [26]. Синтез фітохелатинів і металотіонеїнів в організмі водоростей також розглядають як біомаркери впливу важких металів [27].

Отже, механізми детоксикації йонів важких металів водоростями пов'язані з адсорбцією, внутрішньоклітинним і позаклітинним їх зв'язуванням та перетворенням найбільш токсичної розчинної форми металів у нетоксичні форми. Це відбувається як внаслідок комплексоутворення, так і через зв'язування металів зі специфічними внутрішньоклітинними органелами, синтезованими фітохелатинами або металотіонеїнами, а та-

кож шляхом їх транспортування та секвестрування у певних клітинних компонентах (вакуолі) [19].

Висновки

Показано, що макроскопічні зелені нитчасті водорості *Spirogyra* sp. та *Oedogonium* sp. зі ставків НПП «Голосіївський» накопичують і концентрують значну кількість важких металів (Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Co) з водного середовища, призводячи до його очищення та детоксикації. Водорості здатні адсорбувати, а також транспортувати всередину клітин та зв'язувати найбільш токсичну розчинну (йонну) форму металів.

Встановлено високі значення коефіцієнтів біологічного накопичення металів водоростями, які становлять від сотень і тисяч (для Zn, Co, Cr, Cu, Ni, Pb) до десятків тисяч (для Fe і Mn) та свідчать про значну інтенсивність їхнього поглинання. Загалом за величиною значень коефіцієнтів накопичення у водоростях досліджувані метали можна розташувати у ряду: Fe > Mn > Zn > Ni, Co > Cu, Pb, Cr.

Доведено, що вміст важких металів у зелених нитчастих водоростях *Spirogyra* sp. та *Oedogonium* sp. значною мірою корелює зі ступенем забруднення водойм НПП «Голосіївський», що дає можливість розглядати досліджувані водорості як біоіндикатори якості води.

Високі значення коефіцієнтів накопичення металів зеленими нитчастими водоростями *Spirogyra* sp. та *Oedogonium* sp., їхня достатня стійкість до токсичної дії цих полютантів, швидкий приріст біомаси, широкий ареал, тривалий період вегетації, невибагливість до умов навколишнього середовища та вмісту поживних речовин дозволяють стверджувати, що зазначені водорості відповідають вимогам для їхнього науково обґрунтованого використання як потенційних біомоніторів рівня розчинної (біологічно доступної) форми металів у водному середовищі.

Список використаної літератури

1. Величко И.М. Экологическая физиология зеленых нитчатых водорослей. Киев: Наук. думка, 1982. 198 с.
2. Інструкція з відбирання, підготовки проб води і ґрунту для хімічного та гідробіологічного аналізу гідрометеорологічними станціями і постами. Затверджено наказом ДСНС України № 30 від 19.01.2016 р. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0030388-16#Text>
3. Національний Ботанічний сад ім. М.М. Гришка: ЦККП «СЦЕА». www.nbg.kiev.ua/scientific_activity/scea/
4. Abd Elnabi M.K., Elkaliny N.E., Elyazied M.M. et al. Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: a review. *Toxics*. 2023. Vol. 11, N 7. Art. 580.
5. Al-Homaidan A.A., Al-Ghanayem A.A., Alkhalifa A.H. Green algae as bioindicators of heavy metal pollution in Wadi Hanifah Stream, Riyadh, Saudi Arabia. *Intern. J. Water Res. Arid Environ.* 2011. Vol. 1, N 1. P. 10—15.
6. Arumugam N., Chelliapan Sh., Kamyab H. et al. Treatment of wastewater using seaweed: a review. *Intern. J. Environ. Res. Public Health*. 2018. Vol. 15, N 12. Art. 2851.
7. Barra L., Sardo A., Moros M. et al. Identification of a green algal strain collected from the Sarno River Mouth (Gulf of Naples, Italy) and its exploitation for heavy metal remediation. *Microorganisms*. 2022. Vol. 10, N 12. Art. 2445.

8. Das M., Ramanujam P. Metal content in water and in green filamentous algae *Micrrospora quadrata* Hazen from coal mine impacted streams of Jaintia Hills District, Meghalaya, India. *Intern. J. of Botany*. 2011. Vol. 7, N 2. P. 170—176.
9. Fabre E., Dias M., Costa M. et al. Negligible effect of potentially toxic elements and rare earth elements on mercury removal from contaminated waters by green, brown and red living marine macroalgae. *Sci. Total Environ*. 2020. Vol. 724. Art. 138133.
10. Gorbatiuk L.O., Pasichna O.O., Klochenko P.D. et al. Content of pollutants and their potential toxicity in the water bodies of the «Golosiyivsky» National Nature Park (Ukraine). *Hydrobiol. J.* 2025. Vol. 61, N 2. P. 61—74.
11. Gupta V.K., Rastogi A. Biosorption of lead from aqueous solutions by green algae *Spirogyra* species: kinetics and equilibrium studies. *J. Hazard. Mater.* 2008. Vol. 152, N 1. P. 407—414.
12. Gupta V.K., Rastogi A. Equilibrium and kinetic modelling of cadmium (II) biosorption by nonliving algal biomass *Oedogonium* sp. from aqueous phase. *J. Hazard. Mater.* 2008. Vol. 153, N 1—2. P. 759—766.
13. He J., Chen J.P. A comprehensive review on biosorption of heavy metals by algal biomass: materials, performances, chemistry, and modeling simulation tools. *Bioresour. Technol.* 2014. Vol. 160. P. 67—78.
14. Klochenko P.D., Kharchenko G.V., Zubenko I.B., Shevchenko T.F. Some peculiarities of accumulation of heavy metals by macrophytes and epiphyton algae in water bodies of urban territories. *Hydrobiol. J.* 2007. Vol. 43, N 6. P. 46—57.
15. Lee Yi-Ch., Chang Sh.-P. The biosorption of heavy metals from aqueous solution by *Spirogyra* and *Cladophora* filamentous macroalgae. *Bioresour. Technol.* 2011. Vol. 102, N 9. P. 5297—5304.
16. Lin Z., Li J., Luan Y., Dai W. Application of algae for heavy metal adsorption: a 20-year meta-analysis. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2020. Vol. 190. Art. 110089.
17. Linnik P.N., Zhezherya V.A., Ignatenko I.I. Role of suspended matter fractions differing in the size of their particles in the accumulation and migration of metals in lake systems. *Hydrobiol. J.* 2019. Vol. 55, N 6. P. 91—107.
18. Moenne A., Gonz6lez A., S6ez C.A. Mechanisms of metal tolerance in marine macroalgae, with emphasis on copper tolerance in Chlorophyta and Rhodophyta. *Aquat Toxicol.* 2016. Vol. 176. P. 30—37.
19. Olgun E.J., S6nchez-Galv6n G. Heavy metal removal in phytofiltration and phytoremediation: the need to differentiate between bioadsorption and bioaccumulation. *New Biotechnol.* 2012. Vol. 30, N 1. P. 3—8.
20. Pasichna O.O. Use of macrophytes for biomonitoring and purification of the aquatic environment at combined pollution by heavy metals. *Hydrobiol. J.* 2013. Vol. 49, N 6. P. 72—79.
21. Pasichna O.O. Content of pigments in *Cladophora glomerata* under the influence of copper (II) and manganese (II) ions in the aquatic environment. *Ibid.* 2017. Vol. 53, N 1. P. 65—74.
22. Pasichna O.O., Gorbatiuk L.O., Godlevska O.O. Regularities of the accumulation of heavy metals by aquatic macrophytes and prospects of their use for biomonitoring and phytoremediation. *Ibid.* 2021. Vol. 57, N 1. P. 64—77.
23. Pasichna O.O., Gorbatiuk L.O., Platonov M.O. et al. Biomonitoring of heavy metals pollution in lakes of Kyiv (Ukraine) using submerged macrophytes and assessment of their phytoremediative potential. *Ibid.* 2023. Vol. 57, N 1. P. 64—77.
24. Pasichnaya Ye.A. Toxicity of copper for hydrophytes: Accumulation, effects on photosynthesis, respiration and pigment system (a review). *Ibid.* 2002. Vol. 38, N 4. P. 103—118.
25. Ray S., Singh P.K., Mankotia S. et al. Iron homeostasis in plants and its crosstalk with copper, zinc, and manganese. *Plant Stress*. 2021. Vol. 1. Art. 100008.
26. Salama El.-S., Roh H.-S., Dev S. et al. Algae as a green technology for heavy metals removal from various wastewater. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 2019. Vol. 35, N 5. Art. 75.

27. Shahid M., Pourrut B., Dumat C. et al. Heavy-metal-induced reactive oxygen species: phytotoxicity and physicochemical changes in plants. *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 2014. Vol. 232. P. 1–44.

28. Singh A., Pal D.B., Mohammad A. et al. Biological remediation technologies for dyes and heavy metals in wastewater treatment: new insight. *Bioresour. Technol.* 2022. Vol. 343. Art. 126154.

29. Znad H., Awual Md R., Martini S. The utilization of algae and seaweed biomass for bioremediation of heavy metal-contaminated wastewater. *Molecules.* 2022. Vol. 27, N 4. Art. 1275.

Надійшла 07.04.2025

O.O. Pasichna, PhD (Biol.), Senior Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine,
e-mail: ecopasichna@gmail.com
ORCID 0009-0008-4297-5291

P.D. Klochenko, Dr. Sci. (Biol.), Prof., Head of Department,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: pklochenko@ukr.net
ORCID 0000-0003-4886-6746

G.V. Kharchenko, PhD (Biol.), Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: harchenkogallina@gmail.com
ORCID 0009-0002-6102-2129

M.O. Platonov, PhD (Biol.), Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: n.platonov73@gmail.com
ORCID 0009-0008-4075-4604

O.O. Godlevska, PhD (Phys. and Math.), Assoc. Prof.,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Heroyiv Oborony str. 12, Kyiv, 03041, Ukraine,
e-mail: godlevok@gmail.com
ORCID 0000-0001-9446-1112

PECULIARITIES OF HEAVY METALS ACCUMULATION BY GREEN FILAMENTOUS ALGAE IN WATER BODIES WITH DIFFERENT LEVELS OF ANTHROPOGENIC POLLUTION

It has been shown that macroscopic green filamentous algae *Spirogyra* sp. and *Oedogonium* sp. from the ponds of the «Golosiivsky» National Nature Park (Ukraine) accumulate and concentrate a significant amount of heavy metals (Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Co) from the aquatic environment, leading to its purification and detoxification. The established values of the coefficients of biological accumulation of metals by algae ranged from hundreds and thousands (for Zn, Co, Cr, Cu, Ni, Pb) to tens of thousands (for Fe and Mn). According to the values of accumulation coefficients in algae, the studied metals are arranged in the following order: Fe > Mn > Zn > Ni, Co > Cu, Pb, Cr.

A significant correlation between the content of heavy metals in filamentous algae *Spirogyra* sp. and *Oedogonium* sp. and the concentration of soluble form of metals in the water of the ponds of the «Golosiivsky» National Nature Park has been established. This fact makes it possible to recommend these species for use as biomonitors of heavy metal pollution of water bodies.

Keywords: green filamentous algae, heavy metals, accumulation, biomonitoring, ponds, the «Golosiivsky» National Nature Park.