

ЕКОЛОГІЧНА ФІЗІОЛОГІЯ І БІОХІМІЯ ВОДНИХ РОСЛИН

УДК [574.64+581.1]:581.526.3:546.3

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

Л.О. ГОРБАТЮК, к. т. н., ст. наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна

М.О. ПЛАТОНОВ, к. б. н., наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна

С.П. БУРМІСТРЕНКО, пров. інж.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна,

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

БІОМОНІТОРИНГ ЗАБРУДНЕННЯ ОЗЕР м. КИЄВА (УКРАЇНА) ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗАНУРЕНИХ МАКРОФІТІВ ТА ОЦІНКА ЇХНЬОЇ ФІТОРЕМЕДІАЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ

Розглянуто можливість використання занурених макрофітів *Ceratophyllum demersum* L., *Myriophyllum spicatum* L. і *Potamogeton perfoliatus* L. для біомоніторингу забруднення водойм урбанізованих територій важкими металами. Проведено визначення рівнів накопичення металів (Mn, Pb, Ni, Cd) у зазначених видах вищих водних рослин та встановлено їхній взаємозв'язок з концентрацією металів у воді озер м. Києва (Україна). Визначено коефіцієнти біологічного накопичення металів досліджуваними видами рослин. Встановлено, що найбільшу кількість важких металів акумулюють водні макрофіти з озер Мінське, Лугове, Богатирське, Кирилівське та Йорданське (система озер Опечень). Найменший вміст важких металів виявлено у водних макрофітах з озер Редьчине, Вербне, Синє, Тягле і Тельбін. Рекомендовано використання *C. demersum*, *M. spicatum* і *P. perfoliatus* для фітореємедіації та відновлення екологічного стану водойм, забруднених важкими металами.

Ключові слова: біомоніторинг, водні макрофіти, важкі метали, озера м. Києва, коефіцієнти біологічного накопичення, фітореємедіація.

Ц и т у в а н н я: Пасічна О.О., Горбатюк Л.О., Платонов М.О., Бурмістрєнко С.П., Годлевська О.О. Біомоніторинг забруднення озер м. Києва (Україна) важкими металами з використанням занурених макрофітів та оцінка їхньої фітореємедіаційної здатності. *Гідробіол. журн.* 2023. Т. 59. № 3. С. 80—95.

Важкі метали потрапляють у навколишнє середовище, головним чином, зі стічними водами промислових підприємств, із змивними водами з будівельних майданчиків, з побутовими відходами, а також внаслідок експлуатації та обслуговування транспортних засобів. Зростання концентрації важких металів у навколишньому середовищі може викликати різного роду токсичні ефекти та завдавати шкоди здоров'ю людини внаслідок забруднення ґрунту, води та повітря [18]. Виявлено, що такі метали, як свинець (Pb), кадмій (Cd), хром (Cr), ртуть (Hg), виявляють токсичність для живих організмів навіть при низьких концентраціях у навколишньому середовищі і здатні призводити до отруєнь людей [7].

Традиційні технології видалення важких металів зі стічних вод включають хімічне осадження, мембранну фільтрацію, йонний обмін, хімічне окиснення/відновлення та електролітичні методи. Ці методи є дорогими та іноді недостатньо ефективними при низьких концентраціях металу, а також обмеженими щодо використання внаслідок утворення фільтрату та осаду, утилізація яких також може призводити до забруднення навколишнього середовища [13, 31].

Головною перевагою технологій біовидалення металів із навколишнього середовища є поєднання ефективного зниження концентрації йонів важких металів до дуже низького рівня з використанням недорогих біосорбційних матеріалів. Такі біотехнології є екологічно безпечними та економічно ефективними завдяки використанню мікроорганізмів і рослин, яким властиві біологічні механізми акумуляції та детоксикації важких металів [22, 27, 34].

Водні макрофіти є не тільки одним із важливих компонентів водних екосистем і джерелом живлення для риб та оселищем для багатьох водних безхребетних, але також слугують «біологічними фільтрами» та відіграють важливу роль у кругообігу речовин у водному середовищі. Відомо, що водні макрофіти з різних екологічних груп (занурені, з плаваючим на поверхні води листям та повітряно-водні) мають здатність до поглинання важких металів [8, 24, 29, 32, 34]. Занурені водні рослини можуть поглинати важкі метали з донних відкладів через кореневу систему (якщо вона наявна) чи всією поверхнею безпосередньо з води, або обома способами. Механізм накопичення металів у занурених видів водних рослин включає як пасивне проникнення йонів, так і активне їх поглинання, надходження у цитоплазму клітин та накопичення у вакуолях [14].

Протягом багатьох років проводяться дослідження акумулятивних властивостей водних рослин з метою їхнього використання для біомоніторингу та фітореMediaції вод, забруднених важкими металами. Такі дослідження зосереджуються, зокрема, на механізмах сорбції і чинниках, які впливають на кінетику та рівновагу процесу накопичення металів, а також на вивченні взаємозв'язків між концентраціями акумульованих у рослинних організмах металів та у навколишньому середовищі [9, 16]. Встановлено, що кількість важких металів, накопичених водними рослинами, корелює з їхніми концентраціями у воді та/або донних відкладах [32].

Водні рослини, які використовуються для біомоніторингу та фіторе-медіації, повинні відповідати таким критеріям, як здатність до накопи-чення значної кількості металів, стійкість до токсичної дії зазначених по-лютантів, інтенсивний приріст біомаси, значний ареал і достатньо трива-лий період вегетації [21]. Найбільшою перевагою фіторе-медіації як мето-ду видалення важких металів з води є низька вартість порівняно з інши-ми методами очищення, що забезпечує його ефективність та економічну доцільність [6, 13].

Основними завданнями біомоніторингу є оцінка стану водних екоси-стем, визначення джерел забруднення та оцінка зміни якості води за пев-ний час. Найбільш поширеними видами водних рослин, які знаходять за-стосування для біомоніторингу водних екосистем та фіторе-медіації при-родних та стічних вод, є *Elodea canadensis* L., *Ceratophyllum demersum* L., *Myriophyllum spicatum* L., *Lemna minor* L., представники родини *Potamo-geonaceae* [8, 10, 11, 12, 21]. Можливість здійснення біомоніторингу за-бруднення водойм важкими металами з використанням таких вищих во-дних рослин, як *C. demersum*, *Potamogeton pectinatus* L., *P. lucens* L., *P. per-foliatus* L., *E. canadensis*, *M. spicatum*, *Echinochloa pyramidalis* (Lam.) Hitchc. et Chase, *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Laub., *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. і *Typha domingensis* (Pers.) Poir. ex Steud., представлена у ро-ботах [11, 15, 24, 30].

Озера м. Києва зазнають значного антропогенного впливу, особливо ті, що розташовані у промислових зонах, поблизу будівельних майдан-чиків, транспортних магістралей, сміттєзвалищ. У зв'язку з цим нами було проведено оцінку їхнього забруднення важкими металами з викори-станням найбільш поширених видів занурених макрофітів як біомоніто-рів, а також визначення доцільності використання досліджуваних видів рослин для фіторе-медіації.

Матеріал і методика досліджень

Об'єктами досліджень були занурені вищі водні рослини *Ceratophyl- lum demersum* L., *Myriophyllum spicatum* L., *Potamogeton perfoliatus* L. — ев-ривалентні види, здатні витримувати забруднення води [3]. Це типові види водних рослин у водоймах м. Києва, найбільш численними є і їхні угруповання [19].

Відбір рослинного матеріалу і проб води проводили влітку 2019 р. в період вегетації рослин з 17 озер м. Києва, які відрізнялися між собою за походженням, морфометричними характеристиками та ступенем антро-погенного впливу [1, 17, 33].

Дослідження проводили на правобережних (Мінське, Лугове, Бога-тирське, Кирилівське, Йорданське, Редьчине, Вербне, Центральне, Сине) та лівобережних (Вигурівське Середнє, Алмазне, Райдужне, Тельбін, Со-нячне, Лебедине, Вирлиця, Тягле) озерах.

Пагони досліджуваних вищих водних рослин висушували до повіт-ряно-сухої маси в кімнатних умовах при температурі 28 ± 4 °C без потрап-ляння прямих сонячних променів та з достатньою вентиляцією. Перед

взяттям наважок рослинний матеріал досушували протягом 2 год при 60 °С у сушильній шафі та подрібнювали до порошкоподібного стану. Для кислотного озолення (концентрованою азотною кислотою) рослинного матеріалу використовували мікрохвильову (НВЧ) піч MWS-2 (Berghoff, Німеччина).

Відібрані проби води зберігали і транспортували у поліпропіленових ємностях. Для визначення розчинної форми металів ($Mn_{розч}$, $Pb_{розч}$, $Ni_{розч}$, $Cd_{розч}$) відібрану воду фільтрували через нітроцелюлозні мембранні фільтри Fіogonі (КНР) з діаметром пор 0,45 мкм, потім підкисляли концентрованою азотною кислотою (з розрахунку 12 см³ кислоти на 1 дм³ води) [4].

Визначення вмісту важких металів (Mn, Pb, Ni, Cd) в озолому матеріалі та концентрації розчиненої форми металів у воді проводили методом оптичної емісійної спектроскопії з індуктивно-зв'язаною плазмою на оптичному емісійному спектрометрі іCAP 6300 Duo (Thermo-Fisher Corporation, США) [5, 25].

Коефіцієнти біологічного накопичення металів (КБН) для водних макрофітів визначали як співвідношення: вміст металу в рослинному матеріалі (мг/кг сухої маси)/концентрація металу у воді (мг/дм³) [26, 28].

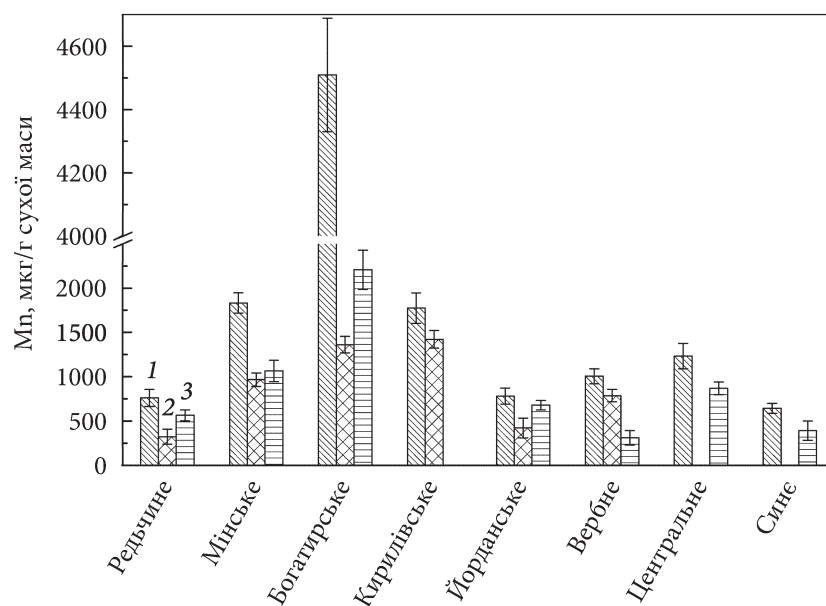
Статистичну обробку одержаних даних (розрахунок середнього значення та стандартного відхилення ($M \pm m$) з 3—4 визначень ($n = 3—4$)) проводили за допомогою програми MS Excel 2016.

Результати досліджень та їх обговорення

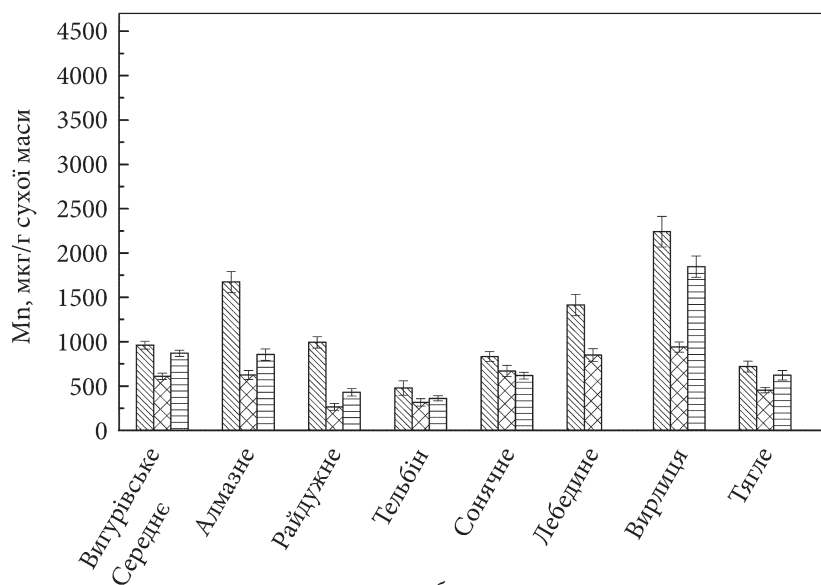
У результаті проведених досліджень по накопиченню важких металів зануреними макрофітами озер м. Києва (*S. demersum*, *M. spicatum* і *P. perfoliatus*) виявлено, що найбільший вміст мангану характерний для рослин, відібраних з озер системи Опечень (Мінське, Богатирське, Кирилівське). Вміст Mn у досліджуваних макрофітах з цих водойм становив 1065—4509 мкг/г сухої маси і досягав максимальних значень у *S. demersum* з оз. Богатирського (4509 мкг/г сухої маси) (рис. 1, а). Серед занурених вищих водних рослин з озер лівого берега м. Києва найбільший вміст Mn, що становив 1673—2242 і 855—1846 мкг/г сухої маси, було виявлено, відповідно, у *S. demersum* і *M. spicatum* з озер Алмазне і Вирлиця (рис. 1, б).

Вміст плюмбуму у занурених макрофітах, зібраних з озер м. Києва, знаходився в межах 1,2—11,8 мкг/г сухої маси (рис. 2). Найвищі його значення (9,5—11,8 мкг/г сухої маси) були характерні для рослин з озер Богатирське, Кирилівське та Йорданське. Меншу кількість досліджуваного металу накопичували рослини з озер Редьчине, Вербне, Центральне та Синє (див. рис. 2, а). Щодо лівобережних водойм м. Києва, то максимальний вміст Pb виявлено у занурених макрофітах з озер Вигурівське Середнє та Лебедине, а найменше металу (1,2—2,3 мкг/г сухої маси) акумулювали рослини з озер Тягле і Тельбін (див. рис. 2, б).

Встановлено, що вміст нікелю у досліджуваних вищих водних рослинах становив 3,1—21,2 мкг/г сухої маси (рис. 3). Серед занурених мак-



а



б

Рис. 1. Вміст мангану у занурених макрофітах правобережних (а) та лівобережних (б) озер м. Києва. Тут і на рис. 2—4: 1 — *Ceratophyllum demersum*, 2 — *Potamogeton perfoliatus*, 3 — *Myriophyllum spicatum* ($M \pm m$; $n = 3-4$)

рофітів з правобережних озер м. Києва найбільше Ni накопичували рослини з озер системи Опечень (Мінське, Богатирське, Кирилівське, Йорданське). Зокрема, максимальний вміст Ni виявлено у *C. demersum* і *P. perfoliatus*, зібраних в оз. Богатирському — відповідно 21,2 і 17,4 мкг/г сухої

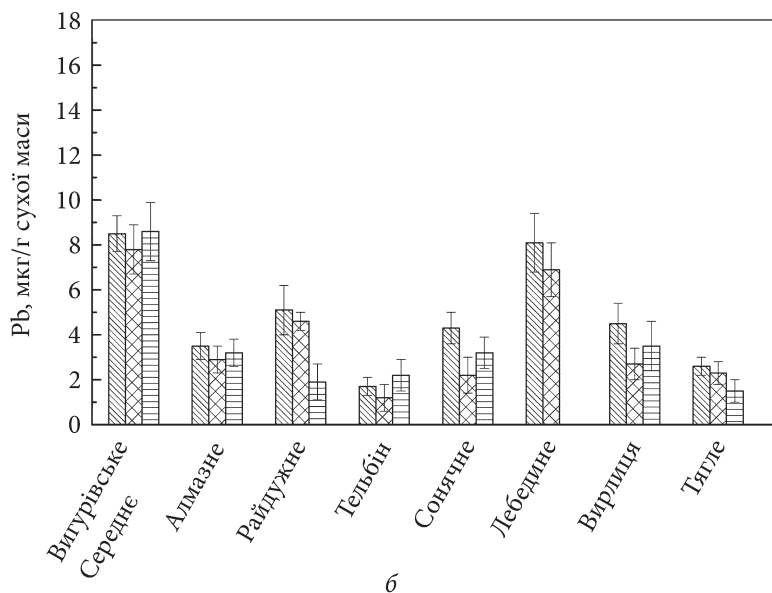
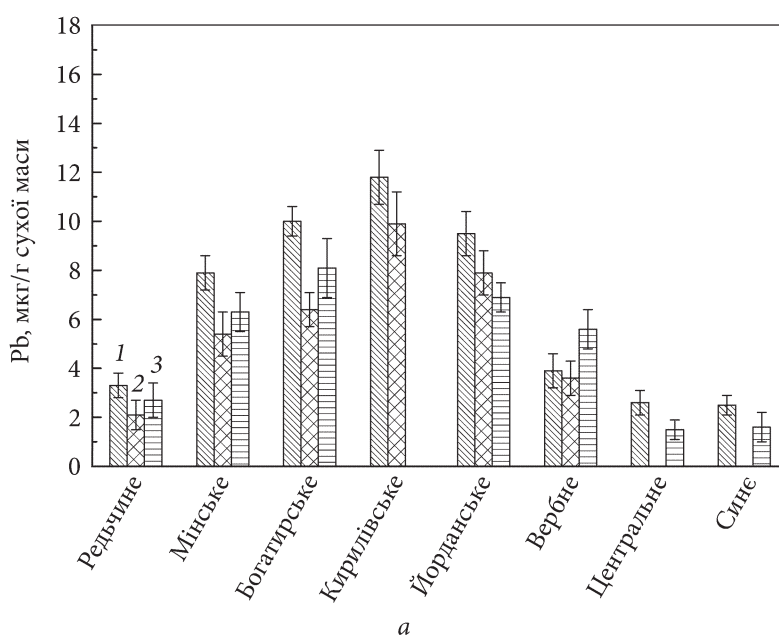
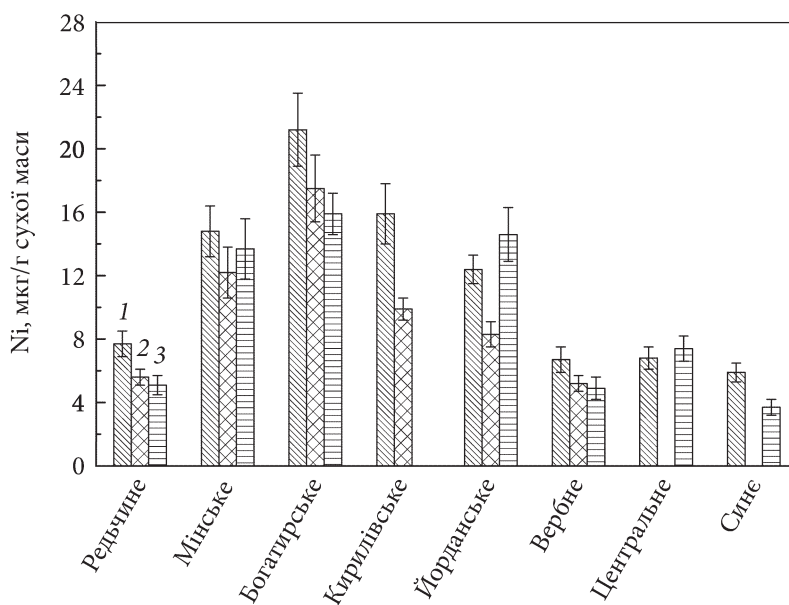


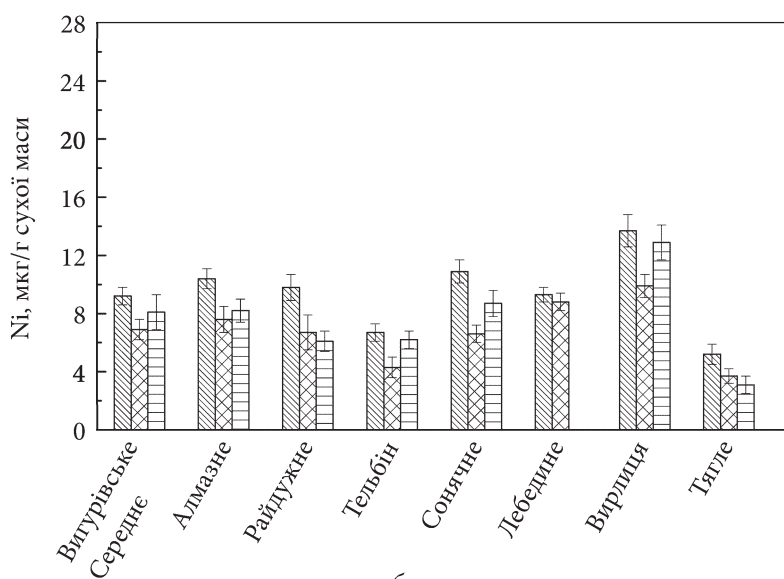
Рис. 2. Вміст свинцю у занурених макрофітах правобережних (а) та лівобережних (б) озер м. Києва

маси (див. рис. 3, а). Дослідження вмісту Ni у водних макрофітах озер лівого берега м. Києва показали, що найбільшу кількість металу було акумульовано у *M. spicatum* і *S. demersum* з оз. Вирлиця (12,9—13,7 мг/г сухої маси) (див. рис. 3, б).

Встановлено, що кадмій у занурених вищих водних рослинах накопичується у незначній кількості (0,08—0,96 мг/г сухої маси) (рис. 4).
 ISSN 0375-8990. Гідробіологічний журнал. 2023. 59(3)



а



б

Рис. 3. Вміст нікелю у занурених макрофітах правобережних (а) та лівобережних (б) озер м. Києва

ймовірно, пов'язано як з високою токсичністю металу, так і з малими його концентраціями у воді досліджуваних водойм. Серед занурених макрофітів з правобережних озер м. Києва найбільшим вмістом Cd характеризувалися *S. demersum* (0,78—0,96 мкг/г сухої маси) і *P. perfoliatus* (0,58—0,75 мкг/г сухої маси) з озер Богатирське і Кирилівське. Значно

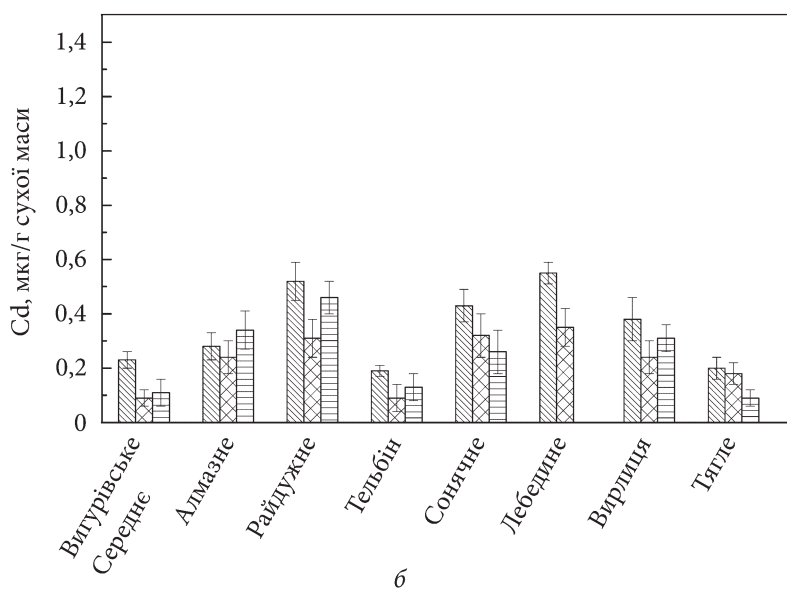
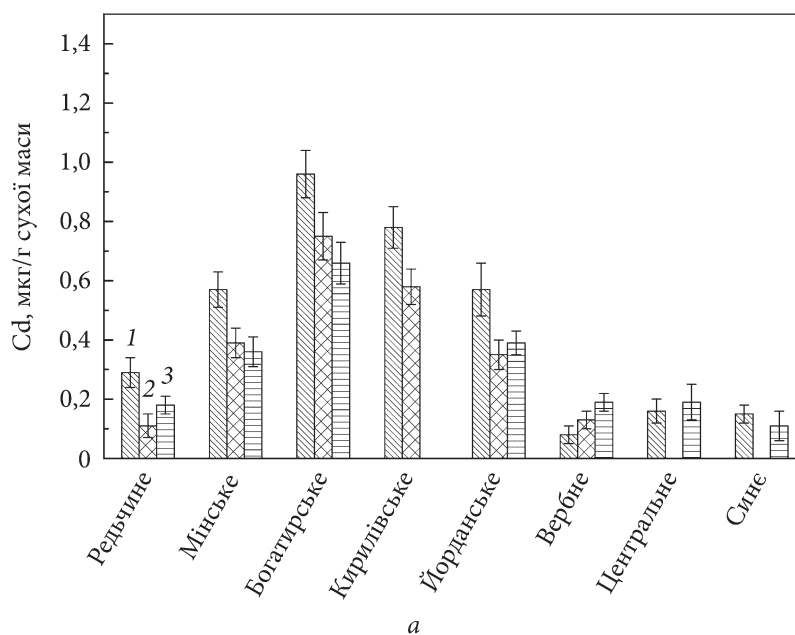


Рис. 4. Вміст кадмію у занурених макрофітах правобережних (а) та лівобережних (б) озер м. Києва

менший вміст Cd було виявлено у рослинах з озер Редьчине, Вербне, Центральне та Сине (див. рис. 4, а). У занурених макрофітах, зібраних з лівобережних озер м. Києва, вміст кадмію коливався в межах 0,09—0,55 мкг/г сухої маси. При цьому більший вміст Cd було виявлено у рослинах з озер Райдужне, Сонячне і Лебедине (див. рис. 4, б).

Відомо, що біодоступність металів для гідробіонтів, в тому числі і для водних рослин, визначається концентрацією їхньої розчинної форми [23]. З метою встановлення зв'язку між рівнем накопичення важких металів у макрофітах і ступенем забруднення води озер м.Києва та оцінки можливості використання *C. demersum*, *M. spicatum* і *P. perfoliatus* для моніторингу забруднення природних вод важкими металами було також проведено визначення концентрації $Mn_{розч}$, $Pb_{розч}$, $Ni_{розч}$, $Cd_{розч}$ у воді озер м. Києва. Встановлені концентрації розчинної форми металів у воді досліджуваних водойм влітку (у період вегетації рослин) відображено на рисунках 5—7.

Серед правобережних озер м. Києва найвищі концентрації $Mn_{розч}$ виявлено у воді озер Богатирське і Лугове (196—220 мкг/дм³), найнижчі — у воді озер Редьчине і Синє (33—52 мкг/дм³) (рис. 5). У воді лівобережних озер м. Києва концентрація розчинної форми мангану влітку знаходилась у межах 26—162 мкг/дм³. При цьому найбільшу концентрацію $Mn_{розч}$ виявлено в озері Лебединому (162 мкг/дм³), а найменшу — в озерах Тягле і Тельбін (26—56 мкг/дм³).

Встановлено, що концентрація $Pb_{розч}$ досягала максимальних значень у воді озер системи Опечень, зокрема Кирилівського, Йорданського та Лугового (17,4—23,2 мкг/дм³) (рис. 6). Це, очевидно, пов'язано з тим, що у ці водойми потрапляє значна кількість дощових стоків з автомобільних магістралей, а також стічні води низки розташованих поблизу промислових підприємств. Значно нижчу концентрацію $Pb_{розч}$ виявлено у воді озер Редьчине, Центральне і Синє (3,1—6,2 мкг/дм³). Серед лівобережних озер м. Києва найвищу концентрацію $Pb_{розч}$ виявлено в озерах Лебедине та Вигурівське Середнє (12,6—15,4 мкг/дм³). В інших озерах лівого берега концентрація плумбуму знаходилась у межах 2,1—9,4 мкг/дм³. Загалом, серед досліджуваних озер м. Києва найнижчі концентрації $Pb_{розч}$ були характерні для води озер Тельбін, Тягле і Синє (2,1—3,5 мкг/дм³) (рис. 6).

Дослідження розчинної форми нікелю у воді правобережних озер м. Києва показали найбільш високі концентрації $Ni_{розч}$ у воді озер системи Опечень (рис. 7). Максимальні значення концентрацій $Ni_{розч}$ виявлено у воді озер Лугове та Богатирське (15,6—17,2 мкг/дм³). У воді озер Редьчине, Центральне і Синє концентрація $Ni_{розч}$ була в декілька разів меншою. У воді лівобережних озер м. Києва концентрація $Ni_{розч}$ знаходилась у межах 1,3—10,1 мкг/дм³, при цьому меншу концентрацію розчинної форми нікелю виявлено у воді озер Тельбін і Тягле (1,3—2,4 мкг/дм³). В інших досліджуваних озерах, розташованих на лівому березі, вміст $Ni_{розч}$ коливався у межах від 5,2 мкг/дм³ (оз. Райдужне) до 10,1 мкг/дм³ (оз. Вирлиця) (рис. 7).

У воді переважної більшості досліджуваних озер м. Києва кадмій не був виявлений. Незначні концентрації Cd (в межах 0,23—0,72 мкг/дм³) зареєстровано у воді озер системи Опечень та оз. Лебедине. При цьому максимальна концентрація Cd становила 0,61—0,72 мкг/дм³ у воді озер Богатирське і Лугове.

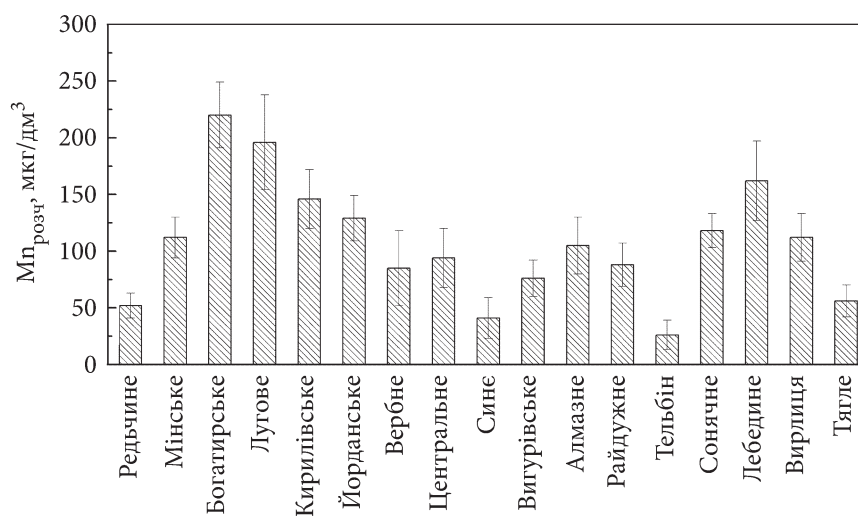


Рис. 5. Концентрація розчинної форми мангану ($Mn_{розч}$) у воді озер м. Києва ($M \pm m$; $n = 3-4$)

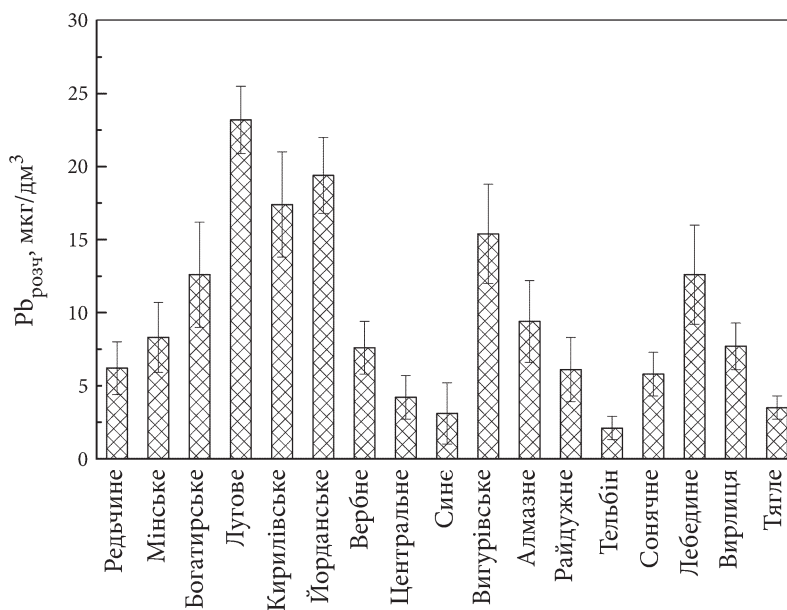


Рис. 6. Концентрація розчинної форми свинцю ($Pb_{розч}$) у воді озер м. Києва ($M \pm m$; $n = 3-4$)

Таким чином, проведені дослідження щодо визначення концентрацій Mn, Pb, Ni, Cd у воді озер м. Києва та рівнів накопичення металів у занурених макрофітах *S. demersum*, *M. spicatum* і *P. perfoliatus* з цих водойм дають можливість зробити висновок, що озера системи Опечень характе-

ISSN 0375-8990. Гідробіологічний журнал. 2023. 59(3) 89

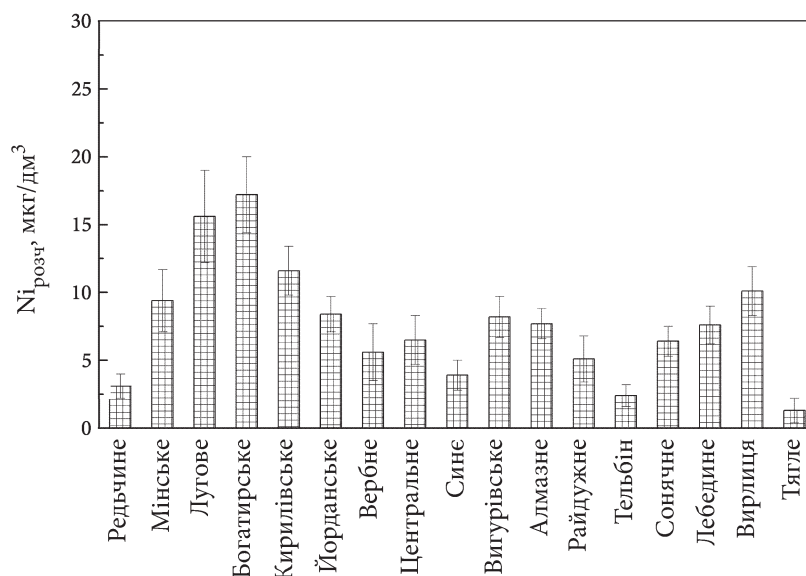


Рис. 7. Концентрація розчинної форми нікелю ($Ni_{розч}$) у воді озер м. Києва ($M \pm m$; $n = 3-4$)

ризуються значним рівнем забруднення, про що свідчать і результати інших авторів [35].

Відомо, що оцінку акумулятивної здатності макрофітів проводять з використанням коефіцієнтів біологічного накопичення (КБН) металів [20, 26, 28].

Отримані значення КБН свідчать про те, що досліджувані види вищих водних рослин здатні в значній мірі акумулювати і концентрувати метали з водного середовища (табл. 1), завдяки чому відбувається його очищення. Однак результати досліджень засвідчили, що КБН металів для водних макрофітів, зібраних з озер м. Києва, мають різні значення, які, ймовірно, залежать від концентрації, біологічної ролі та рівня токсичності конкретного металу, а також пов'язані з морфологічними характеристиками окремих видів. Зокрема доведено фізіологічне значення мангану для росту і розвитку рослин, його участь у метаболічних процесах (входить до складу активних груп багатьох ферментів, прямо чи опосередковано бере участь у багатьох окисно-відновних реакціях та підвищує активність окиснювальних ферментів, підтримує нормальне протікання реакцій дегідрогенізації і декарбоксилювання, пов'язаних з диханням, сприяючи тим самим функціонуванню циклу Кребса, а також відіграє істотну роль у реакціях фотосинтезу) [2]. Очевидно, внаслідок такої значної біологічної ролі мангану для життєдіяльності рослинних організмів, цей метал характеризується найвищими значеннями КБН для водних макрофітів, що досягають десятків тисяч (див. табл. 1). Водночас плюмбум і кадмій не мають встановленої біологічної ролі для живих організмів

Таблиця 1

Коефіцієнти біологічного накопичення металів для занурених макрофітів озер м. Києва

Види	Mn	Pb	Ni	Cd
<i>Ceratophyllum demersum</i>	7 059–23 005	491–1 046	1 046–4 000	333–1593
	4 390	683	1728	978
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	4 134–12 154	339–661	859–2 846	257–1185
	7 048	511	1274	699
<i>Myriophyllum spicatum</i>	3 314–16 486	315–1 029	875–2 583	314–963
	9 578	549	1 420	752

П р и м і т к а. над рискою — граничні значення, під рискою — середні значення.

і навіть у незначних концентраціях виявляють токсичність [7], у зв'язку з цим, очевидно, значення їхніх КБН для рослинних організмів є найнижчими.

Таким чином, в результаті проведених досліджень встановлено взаємозв'язок рівнів накопичення Mn, Pb, Ni, Cd зануреними макрофітами *C. demersum*, *M. spicatum* і *P. perfoliatus* та ступеня забруднення води цими металами, що підтверджує доцільність використання даних видів вищих водних рослин як біомоніторів. Оскільки акумуляція металів рослинними організмами відбувається впродовж тривалого періоду, то за результатами проведеного біомоніторингу з використанням водних рослин можна зробити висновок про хронічний характер забруднення води, водночас визначення концентрацій металів безпосередньо у воді хімічними методами свідчить про рівень її забруднення в конкретний момент часу.

Високі значення КБН металів для *C. demersum*, *M. spicatum* і *P. perfoliatus*, їхня достатня стійкість до токсичної дії зазначених поллютантів, інтенсивний приріст біомаси, значний ареал, достатня тривалість періоду вегетації дають можливість зробити висновок про те, що зазначені види рослин відповідають вимогам для їхнього науково обґрунтованого використання в системі біомоніторингу та фіторе mediaції з метою «оздоровлення» забруднених водойм [21, 29, 30], зокрема озер системи Опечень. Такі біотехнології характеризуються екологічною безпекою та економічною ефективністю, завдяки чому рекомендовані до впровадження [6].

Висновки

Результати проведених досліджень щодо визначення рівнів накопичення важких металів (Mn, Pb, Ni, Cd) у занурених макрофітах *Ceratophyllum demersum*, *Myriophyllum spicatum* і *Potamogeton perfoliatus* та встановлення їхнього взаємозв'язку з концентрацією розчинної форми металів у воді озер м. Києва показали, що водні макрофіти з більш забруднених важкими металами озер накопичують більшу кількість металів. Це свід-

чить про те, що досліджувані види занурених вищих водних рослин доцільно використовувати для біомоніторингу забруднення природних вод важкими металами.

В результаті оцінки забруднення озер м. Києва важкими металами (Mn, Pb, Ni, Cd) з використанням *C. demersum*, *M. spicatum* і *P. perfoliatus* встановлено, що найбільш забрудненими важкими металами є озера Мінське, Лугове, Богатирське, Кирилівське та Йорданське (система озер Опечень), які зазнають значного антропогенного впливу з боку мегаполіса. Найменший вміст Mn, Pb, Ni, Cd виявлено у водних макрофітах з озер Редьчине, Вербне, Синє, Тягле і Тельбін, що дозволяє зробити висновок про їхній незначний рівень забруднення важкими металами.

Встановлено, що досліджувані види занурених макрофітів характеризуються високими значеннями коефіцієнтів біологічного накопичення Mn, Pb, Ni, Cd, що, поряд з достатньою стійкістю рослин до впливу розчинених у воді металів, дає можливість рекомендувати використання *C. demersum*, *M. spicatum* і *P. perfoliatus* для фітореMediaції та відновлення екологічного стану водойм, забруднених важкими металами.

Список використаної літератури

1. Батог С.В. Еколого-гідрологічна характеристика водойм м. Києва : автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Київ, 2018. 20 с.
2. Власюк П.А. Биологические элементы в жизнедеятельности растений. Київ : Наук. думка, 1969. 516 с.
3. Дубына Д.В., Гейны С., Гроудова З. и др. Макрофиты — индикаторы измененной природной среды. Киев : Наук. думка, 1993. 434 с.
4. 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>.
5. ЦКПП «Спектрометрический центр элементного анализа (СЦЭА)» при Национальном ботаническом саде им. Н.Н. Гришко НАН Украины. http://www.nbg.kiev.ua/ru/scientific_activity/scea.
6. Ali S., Abbas Z., Rizwan M. et al. Application of floating aquatic plants in phytoremediation of heavy metals polluted water: a review. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, N 5. <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/5/1927/pdf>.
7. Balali-Mood M., Naseri K., Tahergorabi Z. et al. Toxic mechanisms of five heavy metals: mercury, lead, chromium, cadmium and arsenic. *Front. Pharmacol.* 2021. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972>
8. Basile A., Sorbo S., Conte B. et al. Toxicity, accumulation, and removal of heavy metals by three aquatic macrophytes. *Int. J. Phytoremediation*. 2012. Vol. 14, N 4. P. 374—387.
9. Bonanno G., Borg J.A., Di Martino V. Levels of heavy metals in wetland and marine vascular plants and their biomonitoring potential: A comparative assessment. *Sci. Total Environ.* 2017. Vol. 576. P. 796—806.
10. Buta E., Török A., Csog A. et al. Comparative studies of the phytoextraction capacity of five aquatic plants in heavy metal contaminated water. *Not. Bot. Horti Agrobi.* 2014. Vol. 42, N 1. P. 173—179.
11. Costa M.B., Tavares F.V., Martinez C.B. et al. Accumulation and effects of copper on aquatic macrophytes *Potamogeton pectinatus* L.: Potential application to environmental monitoring and phytoremediation. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018. Vol. 155. P. 117—124.

12. De Souza C.B., Silva G.R. Phytoremediation of effluents contaminated with heavy metals by floating aquatic macrophytes species. 2019. <https://www.intechopen.com/books/biotechnology-and-bioengineering/>.
13. Dhir B., Nasim S.A., Sharmila P., Saradhi P.P. Heavy metal removal potential of dried *Salvinia* biomass. *Intern. J. Phytoremediation*. 2010. Vol. 12, N 2. P. 133—141. DOI:10.1080/15226510903213902. https://www.researchgate.net/publication/45825973_Heavy_Metal_Removal_Potential_of_Dried_Salvinia_Biomass
14. Dhir B., Sharmila P., Saradhi P.P. Potential of aquatic macrophytes for removing contaminants from the environment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2009. Vol. 39, N 9. P. 754—781. DOI:10.1080/10643380801977776.
15. Fawzy M.A., Badr Nel-S., El-Khatib A., Abo-El-Kassem A. Heavy metal biomonitoring and phytoremediation potentialities of aquatic macrophytes in River Nile. *Environ. Monit. Assess*. 2012. Vol. 184, N 3. P. 1753—1771.
16. Galal T.M., Farahat E.A. The invasive macrophyte *Pistia stratiotes* L. as a bioindicator for water pollution in Lake Mariut, Egypt. *Environ. Monit. Assess*. 2015. Vol. 187, N 11. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-015-4941-4>.
17. Goncharova M.T., Kipnis L.S., Konovets I.M. et al. Ecological assessment of water and sediments quality of the Opechen Lakes system (Kyiv). *Hydrobiol. J*. 2020. Vol. 56, N 4. P. 71—83.
18. Gupta R.K., Panchal D., Vardhan P.S. et al. Toxicity of heavy metals on health and their microbial remediation in environment. *Heavy Metals Toxicity in Biological Systems*. New Delhi (India): Discovery Publishing House Pvt. Ltd., 2019. P. 180—193. https://www.researchgate.net/publication/334284279_Toxicity_of_Heavy_Metals_on_Health_and_their_Microbial_Remediation_in_Environment
19. Ivanova I.Yu., Kharchenko G.V., Klochenko P.D. Higher aquatic vegetation of water bodies of the town of Kiev. *Hydrobiol. J*. 2007. Vol. 43, N 3. P. 36—56].
20. 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. *Ibid*. 2007. Vol. 43, N 6. P. 46—57.
21. Krems P., Rajfur M., Wacławek M., Klos A. The use of water plants in biomonitoring and phytoremediation of waters polluted with heavy metals. *Ecol. chem. eng. s*. 2013. Vol. 20, N 2. P. 353—370. DOI: 10.2478/eces-2013-0026.
22. Krot Yu.G. The use of higher aquatic plants in biotechnologies of surface water and wastewater treatment. *Hydrobiol. J*. 2006. Vol. 42, N 3. P. 44—55.
23. 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. *Ibid*. 2019. Vol. 55, N 6. P. 91—107.
24. Matache M.L., Marin C., Rozyłowicz L., Tudorache A. Plants accumulating heavy metals in the Danube River wetlands. *J. Environ. Health Sci. Eng*. 2013. Vol. 11. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3895774/>.
25. Michalke B., Nischwitz V. Chapter 22. Speciation and Element-Specific Detection. *Liquid Chromatography*. 2013. P. 633—649. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128146156000035>
26. Obinna I.S., Eberé E.C. A review: water pollution by heavy metal and organic pollutants: brief review of sources, effects and progress on remediation with aquatic plants. *Analytical Methods in Environ. Chem. J*. 2019. Vol. 2, N 3. P. 5—38. <https://doi.org/10.24200/amecj.v2.i03>.
27. Ojuederie O.B., Babalola O.O. Microbial and plant-assisted dioremediation of heavy metal polluted environments: a review *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2017. Vol. 14, N 12. doi: 10.3390/ijerph14121504 <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5750922/>
28. Olguín E.J., Sánchez-Galván 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.

29. Pasichna O.O., Gorbatiuk L.O., Platonov M.O. et al. Peculiarities of accumulation of heavy metals by aquatic macrophytes of the lakes of Kyiv and assessment of their bioremediation capacity. *Hydrobiol. J.* 2021. Vol. 57, № 4. P. 64—74.
30. Pasichnaya Ye.A., Gorbatiuk L.O., Arsan O. M. et al. Assessment of a possibility of the use of aquatic macrophytes for biomonitoring and phytoindication of the contamination of natural waters by heavy metals. *Ibid.* 2020. Vol. 56, N 1. P. 81—89.
31. Pertile E., Vaclavik V., Dvorsky T., Heviankova S. The removal of residual concentration of hazardous metals in wastewater from a neutralization station using biosorbent-A case study company Gutra, Czech Republic. *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2020. Vol. 17, N 19. doi: 10.3390/ijerph17197225. https://www.researchgate.net/publication/344475586_The_Removal_of_Residual_Concentration_of_Hazardous_Metals_in_Wastewater_from_a_Neutralization_Station_Using_Biosorbent-A_Case_Study_Company_Gutra_Czech_Republic
32. Samecka-Cymerman A., Kempers A.J. Concentrations of heavy metals and plant nutrients in water, sediments and aquatic macrophytes of anthropogenic lakes (former open cut brown coal mines) differing in stage of acidification. *Sci. Total. Environ.* 2001. Vol. 281, N 1—3. P. 87—98.
33. Shevchenko T.F., Klochenko P.D., Kharchenko G.V., Gorbunova Z.N. Phytoepiphyton of megalopolis lakes under conditions of anthropogenic influence. *Hydrobiol. J.* 2021. Vol. 57, N 4. P. 48—63.
34. Unadkat K., Parikh P. A review on heavy metal absorption capacity of aquatic plants: sources, impact and remediation technique. *IJAPRR Intern. Peer Reviewed Refereed J.* 2017. Vol. IV, Iss. XII. P. 23—30. https://www.researchgate.net/publication/322065553_A_Review_on_Heavy_Metal_Absorption_Capacity_of_Aquatic_Plants_Sources_Impact_and_Remediation_Technique
35. Zhezherya V.A., Linnik P.M. Peculiarities of the dynamics of some elements of hydrochemical regime in small water bodies of urban territories: coexisting forms of metals. *Hydrobiol. J.* 2022. Vol. 58, N 5. P. 85—104.

Надійшла 09.11.2022

O.O. Pasichna, PhD (Biol.), Senior Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyra Ivasyuka prosp., 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: ecopasichna@gmail.com

L.O. Gorbatiuk, PhD (Tech.), Senior Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyra Ivasyuka prosp., 12, Kyiv, 04210, Ukraine

M.O. Platonov, PhD (Biol.), Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyra Ivasyuka prosp., 12, Kyiv, 04210, Ukraine

S.P. Burmistrenko, Leading Engineer,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyra Ivasyuka prosp., 12, Kyiv, 04210, Ukraine

O.O. Godlevska, PhD (Phys. and Math.), Assoc. Prof.,
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Heroiv Oborony Str., 15, Kyiv, 03041, Ukraine,
e-mail: godlevok@gmail.com

BIOMONITORING OF HEAVY METALS POLLUTION IN LAKES OF KYIV (UKRAINE) USING SUBMERGED MACROPHYTES AND ASSESSMENT OF THEIR PHYTOREMEDIATIVE CAPACITY

The possibility of using submerged macrophytes *Ceratophyllum demersum* L., *Myriophyllum spicatum* L. and *Potamogeton perfoliatus* L. for biomonitoring of heavy metal pollution of water bodies in urbanized areas was considered. The levels of accumulation of

metals (Mn, Pb, Ni, Cd) in the investigated species of higher aquatic plants were determined and their correlation with the concentration of metals in the water of lakes of Kyiv (Ukraine) were established. The coefficients of biological accumulation of metals by the submerged macrophytes species were determined. It was established that the largest amount of heavy metals is accumulated by aquatic macrophytes from lakes Minske, Luhove, Bohatyrskе, Kyrylivske and Yordanske (Opetchen system of lakes). The lowest content of heavy metals was found in aquatic macrophytes from Redchynе, Verbne, Synie, Tyagle and Telbin lakes. The use of *C. demersum*, *M. spicatum* and *P. perfoliatus* for phytoremediation and restoration of ecological state of water bodies polluted by heavy metals is recommended.

Keywords: *biomonitoring, aquatic macrophytes, heavy metals, lakes of Kyiv, coefficients of biological accumulation, phytoremediation.*