



I. Л. Суходольська, А. І. Мазур

Рівненський державний гуманітарний університет, м. Рівне, Україна

АКУМУЛЯЦІЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ВИЩИМИ ВОДНИМИ РОСЛИНАМИ РІЗНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ГРУП

Проаналізовано особливості використання вищих водних рослин різних екологічних груп для оцінювання забруднення важкими металами водних об'єктів. Показано, що найбільш поширені та стійкі до забруднення види рослин (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Lemna minor* L., та *Ceratophyllum demersum* L.) є природними фільтрами, які активно поглинають та нагромаджують важкі метали. Їхня акумулятивна спроможність визначається вмістом важких металів у середовищах (вода, ґрунт, донні відклади), фізико-хімічними показниками, екологічними особливостями видів, вегетаційним періодом, доступністю для рослин тощо. Показано, що поглинання та акумуляція важких металів вегетативними органами рослин різних екологічних груп значно відрізняється. Зокрема, нагромадження Cr у *P. australis* змінювалося так: корінь > стебло > листок, а нагромадження Mn, Pb, Ni та Cd – корінь > листок > стебло. Інтенсивніше нагромаджують важкі метали (Mn, Zn, Cu, Ni, Co, Cd та Cr) листки *C. demersum*. Лопать *L. minor* активніше поглинає Ni та Cr, а корінь – Co. Виявлено, що концентрація важких металів змінювалася так: *C. demersum* – Fe > Zn > Mn > Co > Ni > Cu, *L. minor* – Mn > Fe > Zn > Co > Ni. Відзначено вплив високих концентрацій важких металів на вищі водні рослини, що насамперед проявляється пригніченням росту та розвитку, зміною вмісту хлорофілу a, b та каротиноїдів, порушенням процесів транспорту електронів і активності фотосистем. З'ясовано, що акумуляція важких металів рослинами визначається цілою низкою різних факторів, тому може змінюватися від групи повітряно-водні > занурені > плаваючі до повітряно-водні > плаваючі > занурені, занурені > плаваючі > повітряно-водні, плаваючі > повітряно-водні > занурені, занурені > повітряно-водні > плаваючі та плаваючі > занурені > повітряно-водні рослини. Поширення, поглинаючі та акумулятивні властивості *P. australis*, *L. minor* та *C. demersum* L. свідчать про ефективність їх використання як індикаторів забруднення важкими металами водних об'єктів та під час облаштування біоплато.

Ключові слова: фітоіндикація; якість води; забруднення; нагромадження.

Вступ / Introduction

Вищі водні рослини, реагуючи на зміну середовища свого існування, об'єктивно відображають стан водної екосистеми. Їхня чутливість до забруднення води проявляється зміною чисельності, біомаси, щільності, зниженням продуктивності, життєвості, уповільненням чи пришвидшенням росту і розвитку. Також істотно змінюються видовий склад домінуючого комплексу та характер заростання водойми. Реакція вищих водних рослин відбувається поступово та найчастіше віддзеркалює тривале забруднення водойми. Чутливість видів та специфічний відгук до присутності у воді полютантів дає змогу використовувати їх для оцінювання якості води. Водночас, завдяки здатності вилучати та поглинати біогенні та небіогенні елементи, вищі водні рослини сприяють ефективному очищенню води. Найбільше вищі водні рослини акумулюють важкі метали, оскільки вони є постійними компонентами водних екосистем, а також в оптимальних концентраціях необхідні для забезпечення фізіологічних процесів видів. Часто концен-

трація важких металів у біомасі вищих водних рослин перевищує їхній вміст у воді, ґрунті та донних відкладах [16]. Нагромадження важких металів вищими водними рослинами залежить від їхнього вмісту в середовищі, наявності інших елементів, екологічних особливостей видів, частини рослини, пори року та періоду вегетації. Істотно відрізняються акумулятивні властивості повітряно-водних рослин, з плаваючими на поверхні води листками та повністю занурених у товщу води видів. Домінантними та субдомінантними представниками зазначених екологічних груп, як лотичних, так і лентичних водойм, є очерет звичайний (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), ряска мала (*Lemna minor* L.) та роголистник занурений (темно-зелений) (*Ceratophyllum demersum* L.). Займаючи великі території прибережних, мілководних та навіть глибоководних ділянок вони є важливими об'єктами, що використовують для оцінювання забруднення водних екосистем важкими металами.

Об'єкт дослідження – акумуляція важких металів у біомасі вищими водними рослинами різних екологічних груп.

Інформація про авторів:

Суходольська Ірина Леонідівна, канд. біол. наук, доцент, кафедра екології, географії та туризму.

Email: iryna.sukhodolska@rshu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-7502-3061>

Мазур Альона Ігорівна, аспірант, кафедра екології, географії та туризму. Email: alona.mazur@rshu.edu.ua;

<https://orcid.org/0000-0002-8736-7387>

Цитування за ДСТУ: Суходольська І. Л., Мазур А. І. Акумуляція важких металів вищими водними рослинами різних екологічних груп. Науковий вісник НЛТУ України. 2022, т. 32, № 6. С. 45–52.

Citation APA: Sukhodolska, I. L., & Mazur, A. I. (2022). Heavy metals accumulation by higher aquatic plants of different ecological groups. *Scientific Bulletin of UNFU*, 32(6), 45–52. <https://doi.org/10.36930/40320607>

Предмет дослідження – методи і засоби оцінювання забруднення важкими металами у біомасі водних об'єктів вищими водними рослинами різних екологічних груп.

Мета роботи – провести порівняльний аналіз акумуляції важких металів вищими водними рослинами різних екологічних груп та встановити можливість їх використання як індикаторів стану водних екосистем.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження: проаналізувати наявні джерела інформації щодо особливостей акумуляції важких металів вищими водними рослинами різних екологічних груп; визначити вміст важких металів атомно-адсорбційним методом; оцінити основні чинники, які впливають на нагромадження важких металів у рослинах; обґрунтувати можливість використання вищих водних рослин як індикаторів стану водних екосистем.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для оцінювання екологічного стану водних об'єктів, з використанням вищих водних, застосовують різні підходи та критерії. Найбільше уваги приділяють вибору конкретних видів-індикаторів. Найчастіше обирають типові види вищих водних рослин, які мають значне поширення у водоймах та можуть нагромаджувати важкі метали без істотних проявів токсичності чи зниження росту [1]. Також враховують, що вищі водні рослини є гіперконцентраторами та деконцентраторами важких металів. Акумуляція важких металів вегетативними органами вищих водних рослин може істотно відрізнитися. Завдяки вираженим бар'єрним функціям одні вищі водні рослини більше нагромаджують важкі метали у підземній частині (корінь, кореневище), інші – у надземній (стебло, листок, суцвіття) [13]. Проте поглинання й акумуляція важких металів вищими водними рослинами значно залежить від концентрації цих речовин у воді, ґрунті та донних відкладах у доступних для видів формах [1, 22].

Індикаторами стану водних екосистем є значна кількість рослин. Однак для об'єктивного оцінення варто одночасно враховувати акумулятивні властивості повітряно-водних рослин, з плаваючими на поверхні води листками та повністю занурених у товщу води видів.

Матеріали та методи дослідження. Відбір зразків водних рослин ($n = 10$) здійснювали у серпні на ділянці річки Устя у містах Рівне ($50^{\circ}37'28.6''N, 26^{\circ}14'27.8''E$) та Здолбунів ($50^{\circ}37'28.6''N, 26^{\circ}14'27.8''E$). Для визначення вмісту важких металів відібрані проби рослин висушували у сушильній шафі за температури $60-65^{\circ}C$ до по-

вітряно-сухого стану. Отриману пробу подрібнювали і просіювали через сито з отворами діаметром 2 мм. Мінералізацію проб здійснювали методом мокрого озонення. Важкі метали визначали у зольних розчинах рослинних проб методом атомно-абсорбційної спектроскопометрії на спектроскопі С-115 М1 за довжин хвиль, які відповідали максимуму поглинання кожного з досліджуваних металів згідно із стандартними методиками. Концентрацію металів виражали в мг на 1 кг сухої маси.

Проведено ґрунтовний аналіз літературних джерел, які відображають особливості акумуляції важких металів вищими водними рослинами різних екологічних груп, та здійснено порівняння із власними результатами.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Типовими представниками багатьох водних об'єктів є *P. australis* (повітряно-водна рослина), *L. minor* (рослина з плаваючими на поверхні води листками) та *C. demersum* (повністю занурена рослина) (рис. 1). *P. australis*, *L. minor* та *C. demersum* – це багаторічні рослини із значним ареалом поширення (космополіти). Розповсюдження плодів, насіння чи спор у *L. minor* та *C. demersum* відбувається різними агентами (перенесення водою, птахами та людиною), а у *P. australis* за допомогою одного ефективного способу (повітряними течіями). *P. australis* та *L. minor* належать до частково вимогливих до світла видів, а *C. demersum* – до тіньовитривалих. Згідно з класифікацією гемеробних екосистем, *P. australis* належить до агемеробів та мезогемеробів, тому може зростати у природних та напівприродних умовах. *L. minor* поширена як на природно-охоронних, так і на трансформованих територіях. Ареал поширення *C. demersum* за ступенем гемеробії – найрізноманітніший (від олігогемеробів до полігемеробів). Тобто вид зростає на природно-охоронних, природних, напівприродних, трансформованих та екотехнічних територіях (табл. 1).

Розглянемо детальніше особливості нагромадження важких металів у біомасі вищими водними рослинами різних екологічних груп.

***P. australis* (Cav.) Trin. ex Steud.** – багаторічна рослина з довгим повзучим кореневищем (див. рис. 1, b). Стебло заввишки 80-500 см, листки жорсткі, широколінійні, заввишки 10-50 мм. Генеративні пагони після цвітіння відмирають [33]. *P. australis* – гідрофіт, геліофіт, який у різних середовищах місцезростання може поглинати значні концентрації важких металів (табл. 2).

Табл. 1. Еколого-біологічна характеристика водної флори / Ecological and biological characteristics of aquatic flora [31, 33]

Характеристика	Види		
	<i>P. australis</i>	<i>L. minor</i>	<i>C. demersum</i>
Біоморфи	Per	Per	Per
Геліоморфи	ScHe	ScHe	Sc
Гігроморфи	Hel	Pl	Hu
Гемеробія	A-MsHr	Og-EuHr	Og-PHr
Регіональність	Cosm	Cosm	Cosm
Життєві форми за С. Гейни (1993)	геломорфи (охтогідрофіти)	гідроморфи (плейстофіти)	гідроморфи (еугідатофіти)
Тип стратегії за Граймом	C	CR	SR
За способом розповсюдження (плодів, насіння, спор)	анемохор	гідрохор, зоохор (орнітохор)	гідрохор, орнітохор, антропохор

Примітка: біоморфи: Ann (Annus) – однорічник; Bien (Biennis) – дворічник; Per (Perennis) – багаторічник; SFr (Suffrutex) – напівкущ; Fr (Frutex) – кущ; Arb (Arbor) – дерево; геліоморфи: He (Heliophiton) – геліофіт (світлолюб); Sc (Sciophiton) – сціофіт (тіньовитривали); HeSc та ScHe – види, частково вимогливі до світла; гігроморфи: Hu (Hydatophiton) – гідатофіт (занурений); Pl (Pleistophiton) – плейстофіт (із плаваючим листям); Hel (Helophiton) – гелофіт (повітряно-водний); гемеробія:

АНr – агемероб, ОgНr – олігогемероб, МsНr – мезогемероб, ЕuНr – еугемероб, РНr – полігемероб; регіональність: Cosm – пльорирегіональні, Сі – голарктичні, Euram – європейсько-північно-американський, Euras – євразійський, Eurosib – євросибірський, Eur – європейський; тип стратегії за Граймом: С – конкуренти; S – стрес-толеранти; R – рудерали.



Рис. 1. Вищі водні рослини / Higher aquatic plants: a) *Ceratophyllum demersum* L., b) *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., c) *Lemna minor* L.

Табл. 2. Вміст металів у воді, донних відкладах та тканинах *P. australis* (Cav.) Trin. ex Steud. / The content of metals in water, bottom sediments and *P. australis* (Cav.) Trin. ex Steud. tissues

Метал	Вода, мг/дм ³	Донні відклади, мг/кг	Рослина, мг/кг сухої речовини					Література
			весь рослина	стебло	листок	корінь	кореневище	
Fe	0,0378	1850	38-109	–	–	–	–	[9]
	–	617-620	–	–	–	–	210-650	[24]
Mn	0,0207	1580	29-112	–	–	–	–	[9]
	–	189-628	–	–	–	–	32-195	[24]
	0,005-0,014	95,4-424	–	11,6-94,8	11,0-169	52,4-279	–	[19]
Zn	0,0066	110	28-46	–	–	–	–	[9]
	–	51-71	–	–	–	–	18-25	[24]
Cu	0,0034	6,0	3,1-6,2	–	–	–	–	[9]
	0,002-0,014	25,5-54,4	–	3,46-17,7	4,21-28,7	6,68-20,5	–	[19]
Pb	0,0022	5,4	0,7-1,3	–	–	–	–	[9]
	<0,005	16,6-46,2	–	0,58-9,93	0,20-11,4	1,47-14,8	–	[19]
Ni	0,0038	2,12	1,7-4,6	–	–	–	–	[9]
	<0,001	29,3-131	–	0,49-3,58	0,30-4,46	0,89-13,5	–	[19]
Co	0,0011	3,9	0,5-1,0	–	–	–	–	[9]
	<0,001	5,12-13,2	–	0,04-0,29	0,08-0,98	0,20-0,82	–	[19]
Cd	0,0004	0,16	0,02-0,14	–	–	–	–	[9]
	<0,001	0,27-0,66	–	0,02-0,14	0,02-0,17	0,05-0,39	–	[19]
Cr	<0,002	35,6-127	–	0,40-6,16	0,21-1,99	1,25-19,1	–	[19]

Розвинена коренева система дає змогу рослині вилучати важкі метали не тільки з води, але і з ґрунту та донних відкладів. Рослини, що відібрані з дренажних каналів породних відвалів вугільних шахт, найбільше акумулювали ферум. Високі концентрації Fe виявлено у листках, коренях та суцвіттях, а коефіцієнт біологічного нагромадження для рослини становив 61,5. У коренях *P. australis* зафіксовано значний вміст Cu, Cd та Co. Листя *P. australis*, окрім феруму, інтенсивно акумулювало Cd, Ni та Pb. Суцвіття містило високі концентрації Cd та Co. Також високі коефіцієнти біологічного нагромадження виявлено для Cd(63,9) та Cu(53,9). Сумарний вміст важких металів у *P. australis* змінювався так: Fe > Cd > Co > Cu > Pb > Zn > Ni > Cr [4]. Автори [19] відзначили, що незалежно від періоду відбору проб вміст Co у біомасі *P. australis* змінювався так: листок > корінь > стебло.

Згідно з результатами [23], концентрація феруму в кореневищах *P. australis* вища у 2-3 рази за його вміст у наземній частині рослини. Вміст мангану, навпаки, вищий у наземній частині рослини, а нижчий – у корене-

вищі. У дослідженнях [26] показано протилежні результати, а саме вищий вміст Mn у кореневищі *P. australis* порівняно з надземною частиною, що пов'язано з більшою рухливістю елемента з донних відкладів. Подібні дані навели інші автори [19], які спостерігали найвищі концентрації Mn у коренях, далі у листках, а потім вже у стеблах. Незалежно від періоду відбору зразків найбільший вміст Cr у *P. australis* виявлено в коренях, потім – у стеблах та листках. Найвищі концентрації Cu у рослині відзначено у листках, коренях, а найнижчі – у стеблах. Вміст Ni та Pb змінювався так: корінь > листок > стебло [19].

Найбільше рослина акумулювала біогенні важкі метали, а значно менше небіогенні, що пов'язано як з їх фізіологічним значенням, так і концентрацією у воді та донних відкладах. Загалом концентрація металів змінювалася так: Mn > Fe > Zn > Cu > Pb > Co > Cd [9].

Високі концентрації важких металів (Cu, Ni, Cd, Pb і Zn) зафіксовано у *P. australis*, відібраних з річки біля військового полігону. За вмістом у рослинах важкі метали розподілилися так: Zn > Cu > Pb > Ni > Cd [14]. У рослин озер також виявлено високі концентрації Pb та

Cd. Зокрема, у листках, стеблах та коренях *P. australis* найвищі концентрації Pb спостерігали у період завершення вегетаційного періоду (листопад), а найнижчі – на початку активної вегетації (травень). Аналогічну закономірність зафіксовано стосовно нагромадження Cd. У рослин озер коефіцієнт біологічного нагромадження Pb у листках *P. australis* становив від 0,36 до 1,1, а у коренях – від 0,30 до 1,31. Коефіцієнт біологічного нагромадження Cd у листках рослини змінювався від 0,91 до 2,91, а у коренях – від 0,96 до 4,62 [21].

Вміст важких металів у *P. australis* варіював навесні – Fe > Cd > Pb > Cu, а восени – Fe > Cd > Cu > Pb. Коефіцієнти біологічного нагромадження *P. australis* (рослина – ґрунт) розподілилися так: навесні – Cu(51) > Cd(0,76) > Fe(0,63) > Pb(0,18), восени – Cd(25,6) > Cu(16) > Fe(1,35) > Pb(1,03). Коефіцієнти біологічного нагромадження *P. australis* (рослина – вода) змінювалися: навесні – Cu(141) > Cd(43) > Fe(10) > Pb(9,4), восени – Cd(149) > Fe(6,7) > Cu(5) > Pb(0,62). Згідно з розрахованими коефіцієнтами *P. australis* навесні є макроконцентратором Cu (з ґрунту та води), Cd, Fe, Pb (з води), а восени – Cd, Cu (з ґрунту та води) та Fe (з води) [27].

Найвищі концентрації важких металів зафіксовано у підземних органах *P. australis*. Зокрема, концентрація металів (Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn) зменшувалася в порядку корінь > кореневище ≥ листок > стебло. Усі без винятку органи рослини продемонстрували істотні відмінності в концентрації Cr, Hg, Mn, Zn, що свідчить про низьку рухливість від коренів до кореневищ і до листків та стебел. Для чотирьох металів зафіксовано однакову тенденцію зниження концентрації металу в кожному з органів рослин (Mn > Zn > Pb > Cu). У коренях, кореневищах, листках та стеблах виявлено найвищі концентрації Mn, а найнижчі – Cd і Cr. Найвищі середні концентрації Cd, Hg, Pb, Zn виявлено у корені, Cr, Mn,

Ni у донних відкладах, а Cu – у воді. Відзначені позитивні лінійні залежності між концентраціями важких металів у всіх органах рослин, воді та донних відкладах свідчать про ефективність використання рослини для фітотомоніторингу [7].

Також доведено ефективність використання *P. australis* під час очищення стічних вод як окремо, так і в поєднанні з іншими рослинами (*Typha latifolia* L.). Вищу ефективність вилучення важких металів з води виявлено у *P. australis*, яка змінювалася так: Fe > Zn > Cr > Pb > Ni > Cu > Cd. Однак за умов зростання *P. australis* разом з *T. latifolia* L. швидкість вилучення важких металів з води збільшується [22]. Отримані результати підтверджують ефективність повітряно-водних рослин акумулювати значну кількість важких металів та зменшувати їхню кількість у воді, ґрунті та донних відкладах.

***Ceratophyllum demersum* L.** – багаторічна занурена водна рослина, завдовжки 20-100 см. Гідрофіт, безкореневий макрофіт з високою здатністю вегетативного розмноження, що росте за низької інтенсивності освітлення на різних глибинах до 9 м (див. рис. 1,а). Стебла ниткоподібні, дихотомічно розгалужені та ламкі. Листки темно-зелені, завдовжки 1,5-2,0 см, зібрані кільцями на стеблі по 4-10. Квітки дуже дрібні, роздільностатеві, знаходяться під водою у пазухах листків [33].

Рослина використовується як біомаркер стресу важких металів, оскільки нагромаджує значні концентрації Zn, Cd, Cu, Cr, Pb і Hg [3, 6, 20]. Особливості метаболізму *C. demersum* L. та властивості присутніх у середовищі металів зумовлюють істотну різницю їх нагромадження у вегетативних органах (стебло, листок) (табл. 3). А вже поглинання важких металів рослинами і подальше нагромадження вздовж харчового ланцюга є потенційною загрозою для здоров'я людини і тварин.

Табл. 3. Вміст металів у воді, донних відкладах та тканинах *Ceratophyllum demersum* L. /
The content of metals in water, bottom sediments and *Ceratophyllum demersum* L. tissues

Метал	Вода, мг/дм ³	Донні відклади, мг/кг	Рослина, мг/кг сухої речовини			Література
			вся рослина	стебло	листок	
1	2	3	4	5	6	7
Fe	0,0378	1850	220-1810	–	–	[9]
	0,020-0,081	5,266– 13,960	326,81- 797,76	–	–	[6]
	–	–	111,88-424,48	–	–	*
Mn	0,0207	1580	780-1340	–	–	[9]
	0,005-0,0148	–	–	275-1189	539-1984	[18]
	–	–	25,07	–	–	*
Zn	0,0066	110	40-110	–	–	[9]
	–	–	0,01398	–	–	[22]
	0,002-0,008	–	–	16,7-75,6	25,6-114	[18]
	0,003-0,092	40,25-91,93	8,59-13,303	–	–	[6]
	–	–	28,43-58,22	–	–	*
Cu	0,0034	6,0	7,1-20	–	–	[9]
	–	–	0,0061	–	–	[20]
	0,002-0,014	–	–	6,48-24,5	9,85-34,5	[18]
	0,001-0,015	10,5-33,23	0,601-2,88	–	–	[6]
	–	–	0,82	–	–	*
Pb	0,0022	5,4	1,7-2,0	–	–	[9]
	–	–	0,0448	–	–	[20]
	–	–	–	55,58	50,64	[32]
	–	–	31-61,6	–	–	[29]
	–	–	–	2,74-12,7	3,18-16,8	[18]
	0,001-0,020	9,43-24,23	1,07-1,48	–	–	[6]
Ni	0,0038	2,1	5,8-14	–	–	[9]
	–	–	17-73,6	–	–	[29]
	–	–	–	3,68– 14,9	6,48– 28,5	[18]
	0,0027-0,053	38,8-103	7,35-12,483	–	–	[6]

1	2	3	4	5	6	7
	–	–	4,97-17,08	–	–	*
Co	0,0011	3,9	3-5	–	–	[9]
	–	–	8,0-21,9	–	–	[29]
	–	–	–	0,69-5,78	1,48-7,63	[18]
	–	–	12,10-22,18	–	–	*
Cd	0,0004	0,16	0,28-0,47	–	–	[9]
	–	–	–	3,65	5,28	[32]
	–	–	5,27-20,6	–	–	[29]
	–	–	–	0,03- 0,35	0,05- 0,42	[18]
	0,0001-0,0024	1,24-3,98	0,32-0,97	–	–	[6]
Cr	–	40,7– 123	–	0,89-8,81	2,08-18,6	[16]
	–	–	23-35,2	–	–	[29]
	0,0001-0,0062	1,39-3,98	0,32-2,953	–	–	[6]

Примітка: * – наведено власні результати.

Вміст Fe у тканинах *C. demersum* змінювався від 111,88 до 424,48 мг/кг сухої речовини, що узгоджується з результатами досліджень інших авторів [6, 9]. Концентрація Mn у рослині була значно порівняно з Fe та становила 25,07 мг/кг сухої речовини. На різних ділянках річки вміст Zn становив 28,43-58,22 мг/кг сухої речовини, Co – 12,10-22,18 мг/кг сухої речовини, а Ni – 4,97-17,08 мг/кг сухої речовини. Найменшою виявилася концентрація Cu у рослині та становила 0,82 мг/кг сухої речовини. Варто зауважити, що вміст важких металів у рослин, відібраних з річки Устя, що протікає у місті Здолбунів, більший, ніж у рослин з річки у Рівному. Вищі концентрації важких металів у рослинах з річки Устя м. Здолбунів можуть бути пов'язані зі значним техногенним навантаженням, оскільки поблизу точок відбору рослин зосереджені найбільші підприємства Рівненщини. Загалом вміст важких металів у *C. demersum* змінювався так 4: Fe > Zn > Mn > Co > Ni > Cu.

Згідно з дослідженнями [28], найвищі концентрації Cd, Pb і Cr зосереджено у листках, а Cu та Zn – у стеблах рослини. Автори [16] також фіксують збільшення вмісту Cr у листках *C. demersum* впродовж всього періоду дослідження (весна, літо, осінь). У річках виявлено нагромадження рослиною Pb і Cd. Однак концентрація Pb у рослині вища у 12 разів за вміст Cd. Найвищу концентрацію Pb виявлено у стеблах, а Cd – у листках *C. demersum* [32]. Окрім цього, *C. demersum* акумулює значні концентрації важливого для фотосинтезу елементу (Fe), коефіцієнт біологічного нагромадження якого становить 17,63 [5]. Водночас, високі концентрації важких металів у водоймі пригнічують ріст та впливають на процес фотосинтезу *C. demersum* L. Наприклад, підвищені концентрації кадмію знижують вміст хлорофілу a, b та каротиноїдів, впливають на процеси транспорту електронів та активність фотосистем [2]. У роботі [20] наведено показники максимальної адсорбційної здатності *C. demersum*, що становлять 6,17 мг/г для Cu(II), 13,98 мг/г для Zn(II) і 44,8 мг/г для Pb(II). Вміст металів у зразках *C. demersum*, відібраних з річки, становить 70,3 мг/г (As), 9,37 мг/г (Cd), 44,9 мг/г (Pb), 27,4 мг/г (Cr), 33,0 мг/г (Ni) та 14,2 мг/г (Co). Загалом сумарний вміст важких металів у *C. demersum* змінювався так: As > Pb > Ni > Cr > Co > Cd [29].

Найвищі значення видалення Cr і Pb у *C. demersum* зафіксовано на 12-й день експерименту. Видалення Cr і Pb рослиною з води становило 84,3 і 95,0 %. Причому рослини нагромаджували важкі метали без будь-яких ознак токсичності чи зниження росту [1]. Видалення із стічних вод Pb, Cd і Ni *C. demersum* було більшим, ніж

Fe, Mn і Zn. Найкраще рослини вилучали важкі метали на 6-й день експерименту [11].

Вміст важких металів у *C. demersum* змінюється залежно від пори року, оскільки потреба в елементах для рослини змінюється. Зокрема, концентрація металів у *C. demersum* мала такий вигляд: взимку – Fe > Zn > Ni > Cu > Cr > Pb > Cd, навесні – Fe > Zn > Ni > Cu > Pb > Cd > Cr, влітку – Fe > Zn > Ni > Cr > Cu > Pb > Cd, восени – Fe > Zn > Ni > Cr > Pb > Cd > Cu. Загальна концентрація важких металів у рослинних тканинах *C. demersum* змінювалася так: Fe > Zn > Ni > Cr > Cu > Pb > Cd [6] та Fe > Mn > Zn > Cu > Ni > Co > Pb > Cd [9]. Найчастіше *C. demersum* використовують для індикації середнього та підвищеного вмісту важких металів [10, 32, 34].

L. minor L. – рослина з плаваючими, округлими, еліптичними або неправильно ланцетними непрозорими пластинками завдовжки 2-4 мм, з коренем 1-4 см (див. рис. 1, с). Квітки одностатеві [33].

Нагромадження важких металів у біомасі *L. minor* залежить від низки чинників та може істотно відрізнятися (табл. 4). Так, вміст Zn та Cu у рослині значно перевищує концентрації металів у воді та донних відкладах [11]. Згідно з дослідженнями [15], вміст Ni змінювався так: донні відклади > *L. minor* (лопоть) > *L. minor* (корінь) > вода. Більш активну акумуляцію Co виявлено у корінні *L. minor*. Так, концентрація Co змінювалася так: донні відклади > *L. minor* (корінь) > *L. minor* (лопоть) > вода [15]. Автори [16] зазначають, що краще нагромаджує Cr лопоть рослини. Високу акумуляційну здатність проявляє *L. minor* щодо Ni та Co, особливо за підвищених концентрацій цих елементів у воді [12]. Загальна концентрація важких металів у рослинних тканинах *L. minor* змінювалася так: Zn > Cu > Pb > Ni [11].

Згідно з проведеними дослідженнями, концентрація Zn змінювалася від 36,03 до 97,52 мг/кг сухої речовини, Mn – від 88,08 до 1357,34 мг/кг сухої речовини, Fe – від 235,2 до 372,14 мг/кг сухої речовини, Ni – від 9,08 до 11,95 мг/кг сухої речовини, а Co – від 12,14 до 15,13 мг/кг сухої речовини. Загалом у найбільших концентраціях *L. minor* нагромаджує Mn та Fe. У рослин, відібраних з річки, що протікає у м Здолбунів, виявлено вищі показники нагромадження Ni, Mn та Fe, ніж у рослин ділянки річки у м. Рівне. У рослин, відібраних на ділянці річки, що протікає у Рівному, зафіксовано вищий вміст Zn та Co. Концентрація важких металів у *L. minor* змінювалася так: Mn > Fe > Zn > Co > Ni. На вміст важких металів у рослинах істотно впливає антропогенне навантаження. Проте специфічна вибірковість нагромадження важких металів у рослин пов'язана насамперед з їх безпосередньою участю у процесах метаболізму.

Табл. 4. Вміст металів у воді, донних відкладах та тканинах *L. minor* L. /
The content of metals in water, bottom sediments and *L. minor* L. tissues

Метал	Вода, мг/дм ³	Донні відклади, мг/кг	Рослина, мг/кг сухої речовини			Література
			вся рослина	(стебло+листок) лопать	корінь	
Zn	0,04-1,2	30-200	300-500	–	–	[11]
	–	–	36,03-97,52	–	–	*
Cu	0,03-0,4	6-100	60-200	–	–	[11]
Mn	–	–	88,08-1357,34	–	–	*
Fe	–	–	235,2-372,14	–	–	*
Pb	–	1-70	1-70	–	–	[11]
Ni	0,28-1,08	29,3-131	–	9,46	5,11	[15]
	0,04-0,3	3-70	10-20	–	–	[11]
	3,05-4,9	–	7111-12881	–	–	[12]
	–	–	9,08-11,95	–	–	*
Co	0,21-0,91	5,12-13,2	–	4,8	5,60	[15]
	–	–	12,14-15,13	–	–	*
Cr	–	40,7– 123	–	1,18-5,32	0,79-4,58	[16]
	1,91-4,2	–	1993,84-5884,87	–	–	[12]

Примітка: * – наведено власні результати.

Найвищі концентрації більшості важких металів виявлено у донних відкладах, далі – у тканинах *L. minor*, а найнижчі – у воді [11, 12, 15]. Концентрування важких металів у коренях та лопаті *L. minor* свідчить про ефективність використання рослини як індикатора забруднення водного середовища.

Вищі водні рослини різних екологічних груп відрізняються акумулятивними властивостями стосовно того чи іншого металу. Наприклад, концентрація Co у біомасі вищих водних рослин зменшувалась так: *L. minor* > *C. demersum* > *P. australis*. Найбільші концентрації Co для *P. australis* виявлено у серпні, для *C. demersum* – у квітні та для *L. minor* – у жовтні. Найвищі концентрації Co впродовж сезону виявлено у коренях *P. australis* та *L. minor*, а також у листках *C. demersum*. Автори [15] фіксували найвищу середню концентрацію Co у коренях *L. minor*, а найнижчу – у стеблах *P. australis*, що може свідчити про активацію рослинами бар'єрних функцій.

Оцінюючи акумулятивні властивості вищих водних рослин, варто враховувати періоди вегетації рослин. Оскільки відомо, що інтенсивний ріст рослин навесні супроводжується швидким поглинанням поживних речовин і важких металів. Під час активного періоду росту концентрація елементів у воді знижується, оскільки їх використовує рослина для забезпечення процесів своєї життєдіяльності. Ближче до завершення вегетаційного періоду та під час старіння збільшується вміст важких металів у різних органах рослин, що може призвести у разі їх відмирання до вторинного забруднення водойми.

Обговорення результатів дослідження. За умов посилення антропогенного забруднення середній вміст важких металів у тканинах вищих водних рослин різних екологічних груп збільшується. Автори [9] зазначають, що незалежно від місця зростання рослин, концентрація металів найчастіше підвищується від групи повітряно-водних рослин до групи плаваючих рослин, а інколи – навпаки. Однак акумуляційні можливості проаналізованих вищих водних рослин (*P. australis*, *C. demersum* та *L. minor*) істотно залежать від концентрації важких металів у воді та донних відкладах. Зокрема, збільшення у середовищі важких металів призводить до їх нагромадження у різних тканинах вищих водних рослин [6, 11, 12, 15, 19]. Високу ефективність нагромадження з води Ni та Co плаваючими рослинами доведено експериментально. Такі ж властивості наведено для

повітряно-водних та занурених вищих водних рослин [9, 18, 19, 29]. Проте надто високі концентрації важких металів сповільнюють ріст вищих водних рослин [15], впливають на вміст хлорофілів а, b та каротиноїдів, їхнє співвідношення і відповідно активність фотосистем [2]. Нагромадження важких металів рослинами визначається цілою низкою різних факторів, тому може змінюватися від групи повітряно-водні > занурені > плаваючі до повітряно-водні > плаваючі > занурені, занурені > плаваючі > повітряно-водні, плаваючі > повітряно-водні > занурені, занурені > повітряно-водні > плаваючі та плаваючі > занурені > повітряно-водні рослини [9, 15, 16, 19].

За результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – виявлено закономірності акумуляції важких металів вищими водними рослинами різних екологічних груп, що визначаються екологічними особливостями видів, вегетаційним періодом, а також концентрацією цих речовин у водному середовищі. Запропоновано використовувати, як індикатори забруднення водних екосистем, стійкі до дії важких металів види, які нагромаджують елементи у високих концентраціях без значних проявів токсичності чи зниження росту.

Практична значущість результатів дослідження – отримані результати дослідження акумуляції важких металів вищими водними рослинами різних екологічних груп можна використати для повнішого оцінення забруднення металами водних екосистем, що підвищить якість моніторингових даних та ефективність використання видів, з урахуванням їх очисної спроможності, під час облаштування біоплато. Також виявлені особливості можна використати під час розроблення рекомендацій щодо оцінювання рівня токсичності та біомоніторингу водних екосистем.

Висновки / Conclusions

Об'єктивними індикаторами забруднення водних екосистем є стійкі до забруднення види вищих водних рослин (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *L. minor* L. та *Ceratophyllum demersum* L.), які здатні поглинати та акумулювати значні концентрації важких металів. Нагромадження важких металів рослинами зале-

жить від їхнього вмісту в донних відкладах, ґрунті та воді, екологічних особливостей видів, а також від вегетаційного періоду. Одні рослини є макроконцентраторами важких металів з ґрунту, другі – з води, треті – з ґрунту та води одночасно. Проте для ефективного використання видів у системі фітомоніторингу необхідно зважати на взаємодію іонів при акумуляції та їх здатність проявляти антагонізм. Загалом поширення, поглинальні та акумулятивні властивості *P. australis*, *L. minor* L. та *C. demersum* L. свідчать про ефективність їх використання як індикаторів забруднення важкими металами водних об'єктів та під час облаштування біоплато.

References

1. Abdallah, M. A. M. (2012). Phytoremediation of heavy metals from aqueous solutions by two aquatic macrophytes, *Ceratophyllum demersum* and *Lemna gibba* L. *Environmental technology*, 33(14), 1609–1614. <https://doi.org/10.1080/09593330.2011.640354>
2. Aravind, P., & Prasad, M. N. V. (2004). Zinc protects chloroplasts and associated photochemical functions in cadmium exposed *Ceratophyllum demersum* L., a freshwater macrophyte. *Plant Science*, 166(5), 1321–1327. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.01.011>
3. Aravind, P., & Prasad, M. N. V. (2005). Cadmium-Zinc interactions in a hydroponic system using *Ceratophyllum demersum* L.: adaptive ecophysiology, biochemistry and molecular toxicology. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17, 3–20. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100002>
4. Baranov, V. I., Knish, I. B., Blaida, I. A., Vaschuk, S. P., & Gavriljak, M. J. (2012). Ocheret zvychainyi – fitoremediant vazhkykh metaliv u drenaznykh kanavakh porodnykh vidvaliv vuhilnykh shakht [Cane – phytoremediant of heavy metals in drainage ditch rock dump coal mines]. *Biologichni studii/Studia Biologica*, 6(1), 93–100. <https://doi.org/10.30970/sbi.0601.188>
5. Basiuk, V. P., Perepelytsia, L. O., & Romanenko, O. O. (2017). The content of ferrum ions in plants of natural reservoirs of Zhytomyr Polissia. *Biologichni doslidzhennia–2017*, 18–20. [In Ukrainian].
6. Bmh, A. T. (2021). Preliminary Assessment of Several Heavy Metal Ions (Fe, Cu, Ni, Zn, Cr, Pb, and Cd) in Water, Sediment, *Ceratophyllum demersum*, and *Potamogeton pectinatus* Plants from Marsh Al-Hawizeh, Iraq. *Journal of Water and Environment Technology*, 19(4), 185–197. <https://doi.org/10.2965/jwet.20-160>
7. Bonanno, G., & Giudice, R. L. (2010). Heavy metal bioaccumulation by the organs of *Phragmites australis* (common reed) and their potential use as contamination indicators. *Ecological indicators*, 10(3), 639–645. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.11.002>
8. Duman, F., Obali, O., & Demirezen, D. (2006). Seasonal changes of metal accumulation and distribution in shining pondweed (*Potamogeton lucens*). *Chemosphere*, 65(11), 2145–2151. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.06.036>
9. Fedonenko, O. V., Filippova, Ye. V., & Sharamok, T. S. (2008). Assessment of the level of contamination of the Zaporizhzhya reservoir with heavy metals using macrophytes. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Seriya Biologiya*, 24, 100–103. [In Ukrainian].
10. Foroughi, M., Najafi, P., & Toghiani, S. (2011). Trace elements removal from waster water by *Ceratophyllum demersum*. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 15(1), 197–201. <https://doi.org/10.4314/jasem.v15i1.68441>
11. García, T. A., & Fonseca, R. R. (2022). Aquatic macrophytes as bioindicators of metals in water reservoirs in venezuela. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 95–109. <https://doi.org/10.20937/RICA.54119>
12. Goswami, C., & Majumder, A. (2015). Potential of *Lemna minor* in Ni and Cr removal from aqueous solution. *Pollution*, 1(4), 373–385.
13. Hoseiniazadeh, G. R., Azarpour, E., Motamed, M. K., Ziaeidoustan, H., Moraditochaeae, M., & Bozorgi, H. R. (2011). Heavy metals phytoremediation management via organs of aquatic plants of Anzali international lagoon (Iran). *World Applied Sciences Journal*, 14(5), 711–715.
14. Jastrzębska, M., Cwynar, P., Polechoński, R., & Skwara, T. (2010). The content of heavy metals (Cu, Ni, Cd, Pb, Zn) in common reed (*Phragmites australis*) and floating pondweed (*Potamogeton natans*). *Pol J Environ Stud*, 19(1), 243–246.
15. Kastratović, V., Bigović, M., Jaćimović, Ž., Kosović, M., Đurović, D., & Krivokapić, S. (2018). Levels and distribution of cobalt and nickel in the aquatic macrophytes found in Skadar Lake, Montenegro. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(27), 26823–26830. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1388-5>
16. Kastratović, V., Jaćimović, Ž., Bigović, M., Đurović, D., & Krivokapić, S. (2016). The distribution and accumulation of chromium in the water, sediment and macrophytes of Skadar lake. *Kragujevac Journal of Science*, 38, 125–134.
17. Kastratović, V., Jaćimović, Z., Đurović, D., Bigović, M., & Krivokapić, S. (2015). *Lemna minor* L. as bioindicator of heavy metal pollution in Skadar Lake (Montenegro). *Kragujevac Journal of Science*, 37, 123–134.
18. Kastratović, V., Krivokapić, S., Bigović, M., Đurović, D., & Blagojević, N. (2014). Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Ceratophyllum demersum* from Skadar Lake, Montenegro. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 79(11), 1445–1460.
19. Kastratović, V., Krivokapić, S., Đurović, D., & Blagojević, N. (2013). Seasonal changes in metal accumulation and distribution in the organs of *Phragmites australis* (common reed) from Lake Skadar, Montenegro. *J. Serb. Chem. Soc.*, 78, 1241–1258.
20. Keskinan, O. L. C. A. Y. T. O., Goksu, M. Z. L., Basibuyuk, M. E. S. U. T., & Forster, C. F. (2004). Heavy metal adsorption properties of a submerged aquatic plant (*Ceratophyllum demersum*). *Bioresource technology*, 92(2), 197–200.
21. Kozłowska, M., Józwiak, A., Szpakowska, B., & Goliński, P. (2009). Biological aspects of cadmium and lead uptake by *Phragmites australis* (cav. Trin ex Steudel) in natural water ecosystems. *Journal of Elementology*, 14(2), 299–312.
22. Kumari, M., & Tripathi, B. D. (2015). Effect of *Phragmites australis* and *Typha latifolia* on biofiltration of heavy metals from secondary treated effluent. *International journal of environmental science and technology*, 12(3), 1029–1038. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0475-x>
23. Maksimović, T., Rončević, S., & Kukavica, B. (2015). Bioaccumulation of iron and manganese in some water macrophytes in the area of Bardača Pond. *Proceedings of the III Symposium of Biologists and Ecologists of the Republic of Srpska (SBERS 2015) II*, Banja Luka, 1(7-2), 87–98.
24. Maksimović, T., Rončević, S., & Kukavica, B. (2019). Seasonal dynamics of heavy metal bioaccumulation (Fe, Mn, Cu, Zn and Pb) in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. in Bardača fishpond. *Kragujevac Journal of Science*, 41, 169–180.
25. Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R. D., Kumar, R., Seth, C. S., & Gupta, D. K. (2006). Lead detoxification by coontail (*Ceratophyllum demersum* L.) involves induction of phytochelatin and antioxidant system in response to its accumulation. *Chemosphere*, 65(6), 1027–1039. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.03.033>
26. Nikolić, L., & Stanković, Ž. (2003). Content of macro-(N, P, K) and micronutrients (Fe, Mn, Zn) in four promising emergent macrophytic species. *Large Rivers*, 14(3-4), 297–306. <https://doi.org/10.1127/Lr/14/2003/297>
27. Perepelytsia, L. O. (2017). Accumulation of heavy metal ions in *Acorus calamus* L. and *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. Ternopilski biologichni chytannia – Ternopil Bioscience – 2017: materialy Vseukr. nauk.-prakt. konf. z mizhnar. uchastiu, prysviach. 20-richchiu zasnuvannia nauk. fakhovoho vydannia Ukrainy "Naukovi zapysky TNPU im. V. Hnatiuka. Ser. Biologiya". Ternopil: Terno-hraf, 280–283. [In Ukrainian].
28. Pourkhabbaz, A. R., Pourkhabbaz, H. R., Khazaei, T., Behravesht, S., & Ebrahimpour, M. (2011). Assessment of heavy metal accumulation in Anzali wetland, Iran, using a submerged aquatic plant, *Ceratophyllum demersum*. *African Journal of Aquatic Science*, 36(3), 261–265. <https://doi.org/10.2989/16085914.2011.636909>

29. Salman, S. A., Almuslamawy, H. A., Sulaiman, A. F., & Mouhamad, R. S. (2022). Atomic Absorption Spectrophotometry for determination of Heavy Metals concentration in the Hornwort and water hyacinth plants growing in Tigris River. *International Journal of Special Education*, 37(3), 10224–10235.
30. Schneider, I. A. H., & Rubio, J. (1999). Sorption of heavy metal ions by the nonliving biomass of freshwater macrophytes. *Environmental Science & Technology*, 33(13), 2213–2217.
31. Skliar, Yu. L. (2017). Flora of higher aquatic plants of Hetmanskyi national nature park. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Serii "Ahronomiia i biolohiia"*, 2(33), 3–9. [In Ukrainian].
32. VahdatiRaad, L., & Khara, H. (2012). Heavy metals phytoremediation by aquatic plants (*Hydrocotyle ranocloides*, *Ceratophyllum demersum*) of Anzali lagoon. *International Journal of Marine Science and Environment*, 2(4), 249–254.
33. Yakubenko, B. Ie., Tsarenko, P. M., Aleinikov, I. M., Shabarova, S. I., Mashkovska, S. P., Diadiusha, L. M., & Tertyshnyi A. P. (2011). Botany with the basics of hydrobotany (aquatic plants of Ukraine). 2nd edition, corrected and supplemented. Kyev: Fitosotsiotsentr. [In Ukrainian].
34. Zuccarini, P., & Kampuš, S. (2011). Two aquatic macrophytes as bioindicators for medium-high copper concentrations in freshwaters. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 145(2), 503–506. <https://doi.org/10.1080/11263504.2010.547677>

I. L. Sukhodolska, A. I. Mazur

Rivne State University for the Humanities, Rivne, Ukraine

HEAVY METALS ACCUMULATION BY HIGHER AQUATIC PLANTS OF DIFFERENT ECOLOGICAL GROUPS

The study analyzes characteristics of higher aquatic plants of different ecological groups to value water objects pollution with heavy metals. The paper demonstrates that the most common and resistant to pollution plant species (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., *Lemna minor* L., *Ceratophyllum demersum* L.) are natural filters that significantly absorb and accumulate heavy metals. Their accumulative ability is defined with heavy metals concentration in the environment (water, soil, and sediment cores), physical and chemical indicators, ecological features, etc. The results of the research show that absorption and accumulation of heavy metals by vegetative parts of plants of different ecological groups differ a lot. In particular, accumulation of Cr in *P. australis* differs as follows: root > stalk > leave. The lowest concentrations of Pb and Cd in all parts of *P. australis* were revealed in May, and the highest ones were found at the end of the growing season in November. The authors define the significant differences in Cr, Hg, Mn, Zn concentrations in all parts of *P. australis*. The average concentration of heavy metals in *P. australis* changed as follows: Fe > Zn > Cr > Pb > Ni > Cu > Cd. The study highlights efficient accumulation of Co with the roots of *L. minor* in all seasons. Heavy metals dependence of accumulation in plant parts was revealed during the growing season. The average concentration of heavy metals in plant tissues of *L. minor* has changed as follows: Mn > Fe > Zn > Co > Ni. The research demonstrates Cr accumulation in the leaves of *C. demersum* in spring, summer, and autumn. High concentration of Cd was observed in leaves, and high concentrations of Pb in stalks of *C. demersum*. The average concentration of heavy metals in *C. demersum* differs as follows: Fe > Zn > Mn > Co > Ni > Cu. Spread of *P. australis*, *L. minor* and *C. demersum* L., their absorbing and accumulating characteristics present their effective use as the indicators of water objects pollution with heavy metals.

Keywords: phytoindication; water quality; pollution; accumulation.