

УДК 57.084.574.5.57.044

О. П. Ольхович, С. В. Гречишкіна, Н. Ю. Таран,
Л. М. Бацманова, Н. Б. Светлова

ЗДАТНІСТЬ ДО АКУМУЛЯЦІЇ МЕТАЛІВ ТА РЕМЕДІАЦІЙНИЙ ПОТЕНЦІАЛ *PISTIA STRATIOTES*¹

Досліджено акумулятивну здатність та ремедіаційний потенціал *Pistia stratiotes* L. у лабораторних та природних умовах. Встановлено, що корені *P. stratiotes* можуть накопичувати окремі елементи від двох до десяти раз більше, ніж листки. Показано вибіркочу здатність до накопичення Li, Co, Ni, Sr, Cd та Bi. Встановлено високий ремедіаційний потенціал *P. stratiotes* і високу здатність до натуралізації у природних водоймах, що може становити загрозу для природного різноманіття і водних ресурсів України.

Ключові слова: *Pistia stratiotes*, метали, фіторемедіація водойм, акумулятивна здатність.

Для інтенсифікації процесу очищення технічних водойм від токсичних елементів, насамперед важких металів, використовують водні рослини, що здатні швидко рости, розмножуватися і інтенсивно поглинати із водного середовища небажані речовини [7, 11, 14, 15, 19, 23]. Швидкі темпи росту, висока акумулятивна здатність, легкість видалення із води і утилізації біомаси плейстофітів робить їх перспективними об'єктами для фіторемедіаційних заходів [13, 16, 22]. Дослідження ремедіаційних можливостей інвазивного для природних водойм України виду *Pistia stratiotes*, який в останні роки у зв'язку зі змінами клімату і можливістю натуралізуватися, набув широкого поширення у водоймах України, зокрема р. Сіверський Донець, має не лише значний науковий, але і практичний інтерес, наприклад, для створення відкритих біоінженерних споруд. Метою нашої роботи було дослідження акумулятивної здатності *P. stratiotes*, визначення її ремедіаційного потенціалу і можливостей використання для очищення відкритих технічних водойм.

¹ Робота виконана за фінансової підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень (договір № Ф 64/31-2016 від 12 квітня 2016 р., державний реєстраційний номер 0116U002823).

© О. П. Ольхович, С. В. Гречишкіна, Н. Ю. Таран, Л. М. Бацманова,
Н. Б. Светлова, 2017

Матеріал та методика досліджень. Об'єктом дослідження був інвазивний вид, плейстофіт *Pistia stratiotes* L. (пістія тілорізоподібна або водний латук), що належить до родини Agaceae. Рослина являє собою розетку великих бархатистих листків голубувато-зеленого кольору, діаметр якої може досягати 25 см і висоти 15 см. Рослина має добре розвинену кореневу систему, що складається з безлічі довгих корінців довжиною до 25—30 см. Оптимальна тривалість світлового дня для цієї рослини становить 10—12 год. У весняно-літній період *P. stratiotes* швидко розвивається і досягає максимальних розмірів [4]. Рослина неморозостійка, гине за температури нижче 10°C.

Культуру *P. stratiotes* вирощували в аквакомплексі ННЦ «Інститут біології». Рослини (50 екземплярів) з діаметром розеток 1,8—2,4 см і масою 1,4—1,9 г експонували впродовж п'яти місяців (травень — вересень 2015 р.) в акваріумі ємністю 60 л за оптимальних умов на відстояній водогінній воді (освітлення 6000 лк, період освітлення — 12 год, температури води 19—25°C, рН 7—8), яку раз на два тижні доливали до мітки новою порцією. Одноразово для підкормки рослин на початку досліду було долито 10 л води з діючого акваріума.

Рослини з природних умов були зібрані у затоці р. Сіверського Дінця біля с. Черемушного Зміївського району Харківської обл. у жовтні 2016 р. Проводили візуальне обстеження рослин та морфометричні виміри: кількості і довжини коренів і листків, діаметру розетки, встановлювали сиру і суху масу.

Вміст пігментів визначали стандартним методом [3] після екстракції 96%-вим етанолом. Екстракт пігментів аналізували на спектрофотометрі «ShimadzuUV-1800» за довжини хвиль 440, 644 та 662 нм. Вміст розраховували на 1 г сухої речовини. Для кількісного визначення хімічних елементів у тканинах коренів та листків рослини попередньо висушували за температури 105°C у сухожаровій шафі до досягнення сталої маси. Отриманий сухий матеріал подрібнювали та озолювали азотною кислотою за методикою мікрохвильової пробопідготовки у Multiwave 3000 Anton Paar (Австрія). Вміст елементів у воді і рослинному матеріалі визначали методом ІСР-спектрометрії на емісійному спектрофотометрі ІСАР6300 Duo МЕС (США).

Статистичну обробку результатів досліджень проводили за допомогою програми Microsoft Office Excel, вони вважалися достовірними при $p \leq 0,05$. Кількість повторів — не менше трьох.

Результати досліджень та їх обговорення

Екземпляри *P. stratiotes*, вирощені впродовж вегетаційного сезону (травень — вересень 2015 р.) в лабораторії за оптимальних умов і екземпляри, які вегетували у природних умовах, розрізнялись навіть при візуальному обстеженні. Розетки з р. Сіверський Донець були крупнішими, більш м'ясистими, з листками більших розмірів, темнішого забарвлення, без видимих ознак ушкодження. Розетки були не такими високими, як у лабораторних умовах (до 9 см), а більш сплюсненими (до 6 см), у той же час середній діаметр розетки був майже у 1,5 рази більшим (Табл. 1).

1. Морфометричні показники *P. stratiotes*, вирощеної в лабораторних і природних умовах (р. Сіверський Донець), $M \pm m, n = 3$

Умови	Кількість листків	Кількість коренів	Довжина листка, см	Довжина кореня, см	Діаметр розетки, см	М сира, г	М суха, г
Лабораторні	9 ± 0,8	22,8 ± 3,0	3,35 ± 0,3	15,4 ± 4,1	8,3 ± 1,3	6,7 ± 1,6	0,40 ± 0,02
Природні	6 ± 2,0	29,4 ± 8,4	4,3 ± 1,0	3,3 ± 1,4	12,3 ± 3,6	8,4 ± 4,6	0,50 ± 0,01

Рослини з природних умов мали у середньому на сім коренів більше, але їх середня довжина була меншою у чотири рази (відповідно 15,4 і 3,3 см). Більша кількість коренів і одночасно їх менша довжина свідчать про достатню кількість і доступність елементів мінерального живлення у верхньому шарі, що опосередковано вказує на високу трофність води у річці. Маса рослин з природних умов також була у середньому на 20% більшою.

Вміст фотосинтетичних пігментів (хл *a*, хл *b* і суми каротиноїдів) у *P. stratiotes* в лабораторних умовах був меншим, ніж у природних, але різниця була незначною (рис.1).

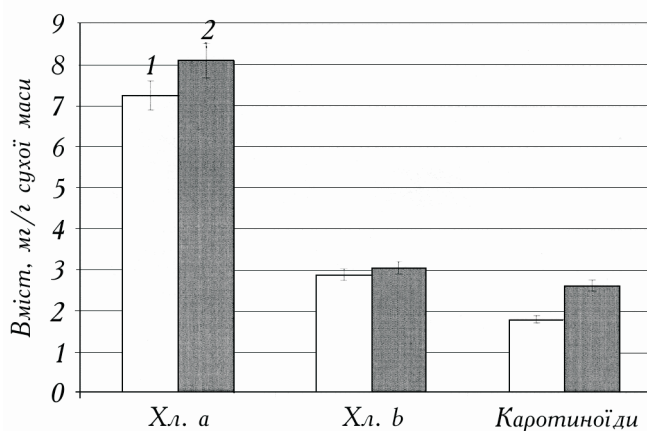
Відомо, що інвазивні рослини при потраплянні із штучних (акваріумів, басейнів) до природних водойм за сприятливих умов зазвичай збільшують розміри завдяки кращому забезпеченню елементами мінерального живлення [6, 10]. Можна припустити, що пістія, яка потрапила до р. Сіверський Донець із очисних комплексів ТЕЦ, отримала кращі умови для росту і розвитку. Для з'ясування цього припущення та визначення акумулятивної здатності було визначено вміст 21 елементу у зразках води, в яких перебувала рослина (з експериментального акваріума і річки), та в її тканинах.

Якість води у природних водних об'єктах оцінюється з точки зору екологічного, санітарно-гігієнічного та водогосподарського підходів. Для оцінки екологічного благополуччя водних об'єктів та визначення комплексу водоохоронних заходів встановлено екологічний норматив якості води — рибогосподарська гранично допустима концентрація (ГДК_{рибогосп}). Її значення для більшості речовин нижчі, ніж ГДК для питної води, за винятком Ва, Ве, Сд, Li і Рb [5].

У воді р. Сіверський Донець у жовтні 2015 р. було виявлено перевищення ГДК_{рибогосп} чотирьох елементів: Мп, Сu, Zn і Мо. Концентрація Мп становила 76,5 мкг/дм³, тобто перевищувала ГДК_{рибогосп} у 7,6 разу, Zn — 18,9 мкг/дм³ (майже у два рази), концентрація Сu і Мо — відповідно 5,63 і 1,37 мкг/дм³, тобто перевищення було незначним (рис. 2).

В лабораторних умовах вміст хімічних елементів у коренях *P. stratiotes* у більшості випадків (за винятком Ві і Sr) був вищим, ніж у листках (рис.3). Так, вміст Li, Ni, Сu та Ва у коренях був вищим приблизно удвічі, Cd і Со — у чотири рази, Fe — у п'ять, Zn — у сім, Тl — у вісім, а Pb, V і Al — більш, ніж

у десять раз. Це свідчить про те, що рослина поглинає із води мінеральні та інші речовини, у тому числі і важкі метали, насамперед кореневою системою. За сприятливих умов *P. stratiotes* утворює міцну кореневу систему, завдяки якій може збільшувати кількість поглинутих речовин.



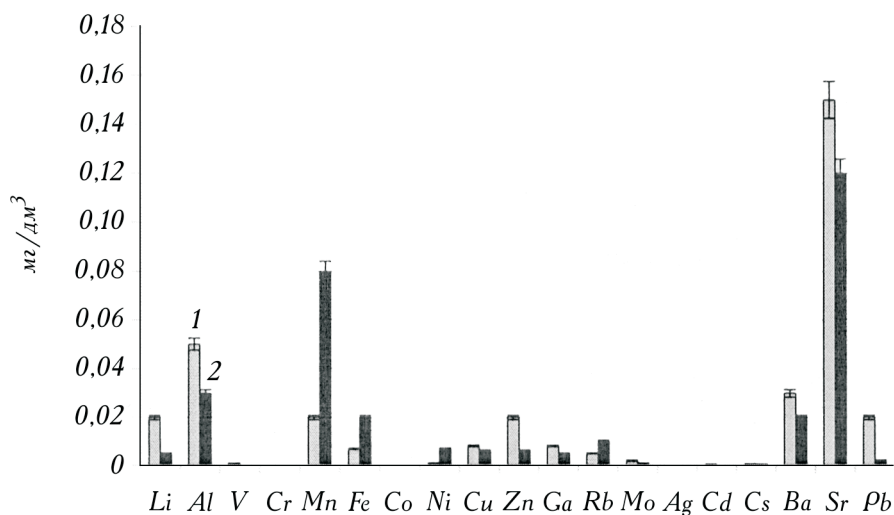
1. Вміст пігментів у *P. stratiotes*, вирощеної в лабораторних (1) і природних (2) умовах (р. Сіверський Донець).

Здатність рослин, що мешкають у забруднених водоймах, накопичувати метали переважно у коренях свідчить про наявність захисних механізмів, які діють за умови високого вмісту токсикантів у воді. Ймовірно, у *P. stratiotes* при збільшенні концентрації металів спрацьовують подібні механізми, що регулюють їх надходження до організму і сприяють їхній детоксикації, що зменшує транспортування іонів до листків. Це найкраще проявляється створенням бар'єру на межі корінь — пагін, що сприяє захисту листків від надмірного надходження металів. Фізіологічне значення цього процесу полягає у зниженні їх концентрацій в органах рослини, де найактивніше відбуваються процеси біосинтезу, насамперед у мезофілі листка.

Захисні реакції рослин по відношенню до різних елементів є неоднаковими. Основними механізмами захисту рослини вважають хелатування, іммобілізацію, детоксикацію іонів металів компонентами антиоксидантного захисту, синтез глутатіона, проліна і поліамінів, зміну балансу фітогормонів (абсцизової кислоти, етилену) [8, 9, 11, 12, 17, 23].

Є дані [1], що за низької концентрації метали без перешкод надходять з коренів до листків, у разі її збільшення включаються захисні механізми, які гальмують цей процес, і вміст металів у коренях, порівняно з листками, стає значно більшим. У разі подальшого збільшення концентрації металів відбувається пошкодження ферментних систем і клітинних структур, які беруть безпосередню участь у захисних реакціях, тоді механічні та фізіологічні бар'єри перестають функціонувати і вміст металів зростає і у листках.

Для фітореMediaції технічних та природних водойм сьогодні активно використовують такі види вищих водних рослин, як *Phragmites australis*, *Typha latifolia*, *T. angustifolia*, *Stuckenia pectinata*, *Potamogeton crispus*, *Elodea canadensis*, *Spirodela polirhiza*, *Najas marina*, *Myriophyllum spicatum* тощо, тобто рослини, які є типовими представниками природних водойм.



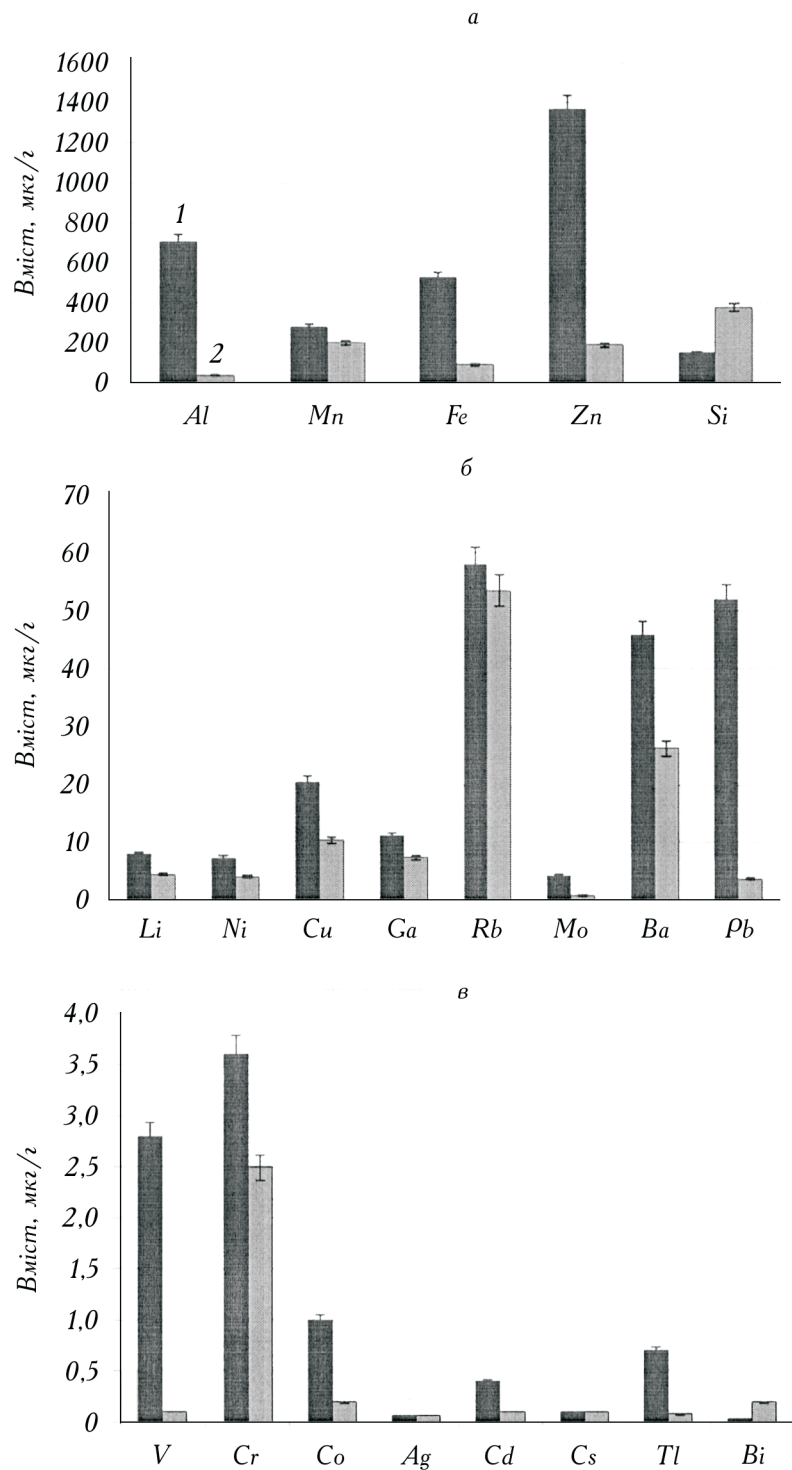
2. Вміст хімічних елементів у акваріумній (1) і річковій (2) воді.

Відомо, що *Typha angustifolia* здатна видаляти з води ряд органічних сполук, має високі адаптивні властивості і може рости в дуже забруднених водоймах. У кореневій системі рослин, які вегетували на берегах шламонакопичувачів електростанцій, концентрація заліза досягала 199,1 мкг/г, марганцю — 159,5, міді — 3,4, цинку — 16,6 мкг/г [20]. Також коренева система *Typha angustifolia* має високу акумулятивну здатність відносно свинцю [18, 21].

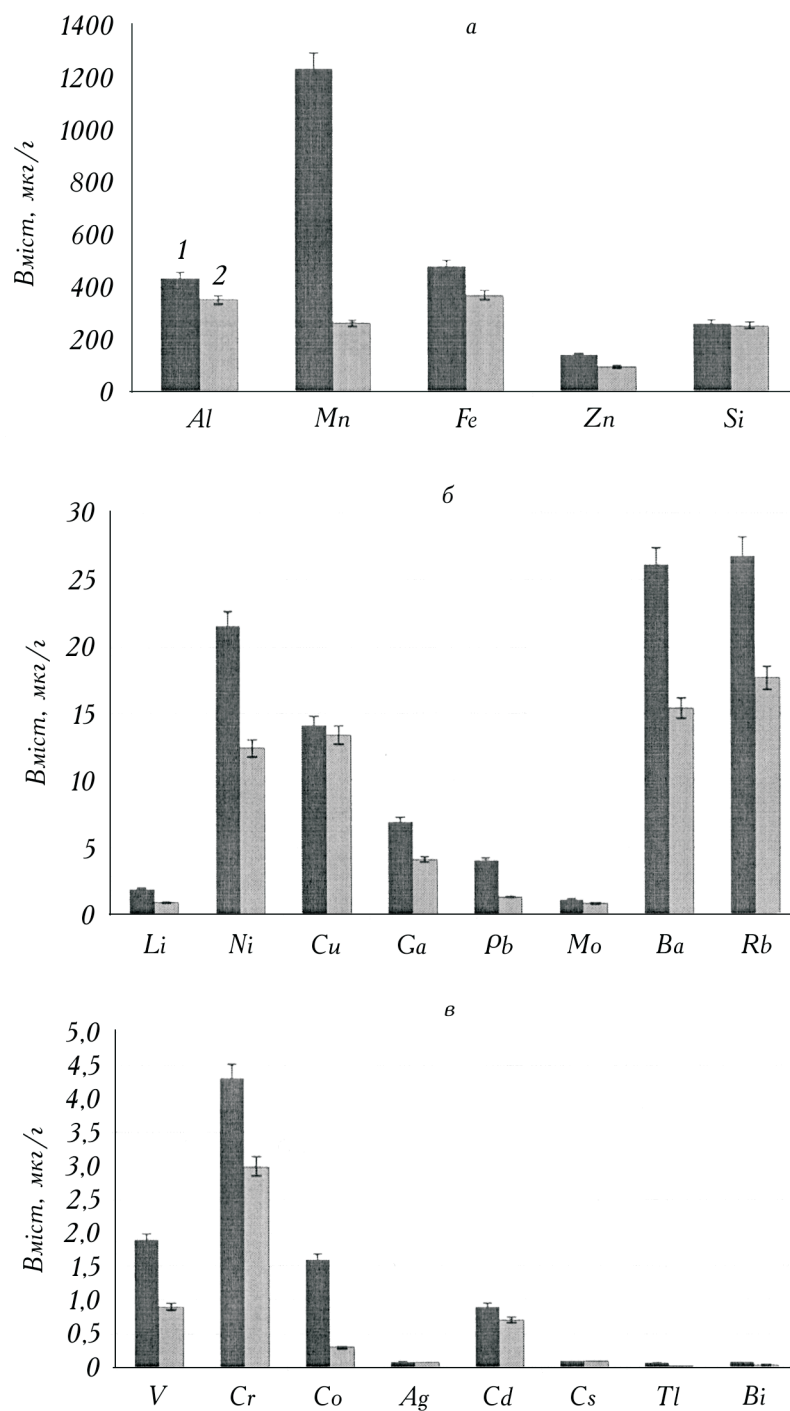
Розподіл вмісту елементів в екземплярах *P. stratiotes* з р. Сіверський Донець був аналогічним такому в лабораторних екземплярах — вміст всіх досліджуваних елементів у коренях був вищим, ніж у листках (рис. 4).

У коренях *P. stratiotes* з р. Сіверський Донець вміст заліза становив 479,3 мкг/г, марганцю — 1233, міді — 14,1 і цинку — 139,4 мкг/г, тобто був у декілька разів вищим, ніж у *T. angustifolia* з берегів шламонакопичувачів електростанцій. Це дає підстави рекомендувати *P. stratiotes* для очищення вод технічних водойм, забруднених важкими металами. Однак слід зазначити, що використовувати інвазивні види, такі як *P. stratiotes*, необхідно обережно у зв'язку з швидкою натуралізацією, агресивною поведінкою у природних фітоценозах і ймовірною загрозою біорізноманіттю у разі виходу за межі очисних споруд і збільшення їх продуктивності.

Накопичення різних елементів досліджуваною рослиною у природних і лабораторних умовах дещо розрізнялось. Так, вміст Li становив відповідно 18,9 і 7,9 мкг/г, Co — 1,6 і 0,9, Ni — 21,6 і 7,2, Sr — 259,6 і 150,7, Cd — 0,9 і 0,4, Bi — 0,07 і 0,04 мкг/г, тобто був більшим у рослин з річки.



3. Вміст елементів у коренях (1) і листках (2) *P. stratiotes*, вирощеної в лабораторних умовах. Тут і на рис. 4: а — концентрація до 1500 мкг/г; б — концентрація до 100 мкг/г; в — концентрація до 10 мкг/г.



4. Вміст елементів у коренях (1) і листках (2) *P. stratiotes* з р. Сіверській Донець.

На час досліджень вміст чотирьох елементів (Mn, Fe, Ni і Rb) у річковій воді був вищим, ніж в акваріумній, тобто лише одного (Ni) із найбільш акумульованих пістією із річкової води. Це означає, що корені рослини виявили вибірккову акумулятивну здатність до Li, Co, Sr, Cd і Bi, вміст яких у річковій воді не перевищував їх вміст у акваріумній, а підвищений вміст Ni у коренях зумовлений саме його надлишком у річковій воді.

У листках і коренях пістії вміст Li, Co, Ni, Sr, Cd і Bi був значно вищий ніж у річковій воді, тому можна припустити, що ці елементи до річки потрапили раніше, а на момент відбору проб води, ймовірно, вже були вилучені із води різними гідробіонтами, у тому числі і *P. stratiotes*.

Після відмирання водні рослини можуть забруднювати воду елементами, які були накопичені впродовж вегетаційного сезону, тому існують рекомендації стосовно граничного вмісту важких металів у їх тканинах. Так, вміст Pb не повинен перевищувати 5,0 мкг/г, Cd — 1,0, Cu — 3,0, Zn — 23,0, Ni — 4, Co — 5, Cr — 6,0 мкг/г [2]. У пістії з р. Сіверський Донець вміст Zn у коренях становив 139,0 мкг/г, тобто перевищував рекомендований у шість раз, вміст Ni — 21,6 мкг/г (у 5,4 разу), Cu — 14 мкг/г (у 3,7 разу), у той же час вміст Pb становив 4,0 мкг/г, Co — 1,6, Cr — 4,3 і Cd — 0,9 мкг/г, тобто був нижчим за рекомендований.

Враховуючи, що маса екземплярів *P. stratiotes* з природних умов була приблизно на 20% більшою, ніж екземплярів з лабораторних, можна стверджувати, що вилучення елементів, у тому числі і токсичних, в природних умовах відповідно буде більшим інтенсивним, ніж в лабораторії. Це дає можливість рекомендувати *P. stratiotes* для фітореMediaції великих технічних водойм, але лише ізольованих від природних, що унеможливить її вихід за межі очисних споруд і поширення у природі.

Висновки

У природних умовах *Pistia stratiotes* може вибірково вилучати окремі елементи з води. Корені накопичують хімічні елементи від двох до десяти раз більш інтенсивно, ніж листки рослини. За сприятливих умов *P. stratiotes* утворює міцну кореневу систему, завдяки якій може збільшувати кількість поглинутих речовин, у тому числі і токсичних, що має важливе значення при її використанні для очищення забруднених водойм.

У воді р. Сіверський Донець виявлено перевищення ГДК_{рибгосп} за Mn, Cu, Zn і Mo та їх підвищений вміст у коренях і листках *P. stratiotes*. Також відмічено підвищений вміст Li, Co, Ni, Sr, Cd та Bi за відсутності їх надлишкової кількості у річковій воді, що вказує на вибірккову акумулятивну здатність цієї рослини.

У порівнянні з іншими рослинами, що є типовими представниками природних водойм України, насамперед *Typha angustifolia*, *P. stratiotes* має вищий реMediaційний потенціал, але одночасно і вищий ризик неконтрольованого поширення і вторинного забруднення водойм.

Зважаючи на те, що *P. stratiotes* є інвазивним видом, який у разі надмірного розростання і виходу за межі очисних споруд і натуралізації у природних водоймах може становити загрозу для природного різноманіття і безпеки водних фітоценозів України, використовувати цю рослину для ремедіації технічних водойм слід обережно, враховуючі всі ймовірні негативні наслідки.

**

Исследована аккумулярующая способность Pistia stratiotes L. в лабораторных и природных условиях. Установлено, что корни могут накапливать отдельные элементы от двух до десяти раз больше, чем листья. Показано избирательную способность к накоплению Li, Co, Ni, Sr, Cd и Bi вегетативными органами P. stratiotes. Установлен высокий ремедиационный потенциал растения. В то же время высокая способность к натурализации в природных водоемах может представлять угрозу для природного разнообразия и безопасности водных ресурсов Украины.

**

Accumulation ability and remediation potential of Pistia stratiotes under laboratory and natural conditions (in the Siverskiy Donets River) was studied. Roots were shown to accumulate several elements more intensively (two to ten times) than leaves. Selective ability to accumulate Li, Co, Ni, Sr, Cd and Bi was revealed. The high remediation potential of P. stratiotes was stated, however its high potential for naturalization in natural water bodies poses a threat to natural diversity and safety of the water resources of Ukraine.

**

1. Башмаков Д.И., Лукаткин А.С. Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжелых металлов у высших растений. — Саранск: Изд-во Морд. ун-та. 2009. — 236 с.
2. Васюков О.С. Хімічний аналіз в оцінюванні екологічного стану поверхневих водних об'єктів: Автореф. дис... докт. хім. наук. — Харків, 2006. — 32 с.
3. Гавриленко В.Ф., Ладыгина М.Е., Хангобина Л.М. Большой практикум по физиологии растений. — М.: Высш. шк., 1975. — 392 с.
4. Грузинская И. А. Семейство аронниковые (Araceae) // Жизнь растений. — М.: Просвещение, 1982. — Т. 6. — С. 492—493.
5. Зенин А.А., Белоусова Н.В. Гидрохимический словарь. — Л.: Гидрометеодиздат, 1988. — 240 с.
6. Казарінова Г.О., Гамуля Ю.Г., Громакова А.Б. Масовий розвиток *Pistia stratiotes* (Araceae) в р. Сіверський Донець (Харківська область) // Укр. бот. журн. — 2014. — Т. 71, № 1. — С. 17—21.
7. Короткевич Л.Г. К вопросу использования водоохранно-очистных свойств тростника обыкновенного // Вод. ресурсы. — 1976. — № 5. — С. 198—204.
8. Серегин И.В., Кожевникова А.Д. Физиологическая роль никеля и его токсическое действие на высшие растения // Физиол. растений. — 2006. — Т. 53, № 2. — С. 285—308.
9. Фазлиева Э.Р., Киселева И.С., Жуйкова Т.В. Антиоксидантная активность листьев *Melilotus albus* и *Trifolium medium* из техногенно нарушенных местообитаний Среднего Урала при действии меди // Там же. — 2012. — Т. 59, № 3. — С. 369—375.

10. Чорна Г.А. Флора водойм і боліт Лісостепу України. Судинні рослини. — К.: Фітосоціоцентр, 2006. — 184 с.
11. Холодова В.П., Волков К.С., Кузнецов В.В. Адаптация к высоким концентрациям солей меди и цинка хрустальной травки и возможность ее использования в целях фиторемедиации // Физиол. растений. — 2005. — Т. 52, № 6. — С. 848—858.
12. Hall J.L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance // J. Exp. Bot. — 2002. — Vol. 53. — P. 1—11.
13. Liang J., Lei Z., Chen Z. Study on the phytoremediation of Cu polluted water by *Pistia stratiotes* L. // J. Zhongkai Univ. of Agriculture and Technology. — 2008. — N 1. — P. 986—993.
14. Miretzky P., Saralegui A., Cirelli A.F. Simultaneous heavy metal removal mechanism by dead macrophytes // Chemosphere. — 2006. — Vol. 62. — P. 247—254.
15. Mishra V.K., Tripathi B.D. Concurrent removal and accumulation of heavy metals by the three aquatic macrophytes // Biores. Technol. — 2008. — Vol. 99. — P. 7091—7097.
16. Odjegba V.J., Fasidi I.O. Phytoremediation of heavy metals by *Eichhornia crassipes* // Environmentalist. — 2007. — Vol. 27. — P. 349—355.
17. Okurut T.O., Rijs G.B.J., Van Bruggen J.J.A. Design and performance of experimental constructed wetlands in Uganda, planted with *Cyperus papyrus* and *Phragmites mauritianus* // Water Sci. Technol. — 2006. — Vol. 40. — P. 265—271.
18. Panich-pat T., Srinives P., Kruatrachue M. et al. Electron microscopic studies on localization of lead in organs of *Typha angustifolia* grown on contaminated soil // Sci. Asia. — 2005. — Vol. 31. — P. 49—53.
19. Prasad M.N.V., Prasad R. Nature's cure for cleanup of contaminated environment — a review of bioremediation strategies // Rev. Environ. Health. — 2012. — Vol. 28. — P. 181—189.
20. Samkaram Unni K., Philip S. Heavy metal uptake and accumulation by *Typha angustifolia* from wetlands around thermal power station // Inter. J. Ecol. Environ. Sci. — 1990. — Vol. 16, N 2/3. — P. 133—144.
21. Sharain-Liew Y.L., Joseph C.G., How S. Biosorption of lead contaminated wastewater using cattails (*Typha angustifolia*) leaves: kinetic studies // J. Serb. Chem. Soc. — 2011. — Vol. 76, N 7. — P. 1037—1047.
22. Skinner K., Wright N., Porter-Goff E. Mercury uptake and accumulation by four species of aquatic plants // Environ. Pollut. — 2007. — Vol. 145. — P. 234—237.
23. Tewari A., Singh R., Singh N.K., Rai U.N. Amelioration of municipal sludge by *Pistia stratiotes* L.: role of antioxidant enzymes in detoxification of metals // Biores. Technol. — 2008. — Vol. 99. — P. 8715—8721.