

УДК 574.64:581.526.3:546.3

Е. А. Пасичная¹, Л. О. Горбатюк¹, О. М. Арсан¹,
Н. А. Платонов¹, С. П. Бурмистренко¹, О. А. Годлевская²,
А. Гопинат³

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ МАКРОФИТОВ ДЛЯ БИОМОНИТОРИНГА И ФИТОИНДИКАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

Исследована аккумуляция тяжелых металлов водными макрофитами, принадлежащими к разным экологическим группам. Показано, что уровень накопления металлов макрофитами отражает степень антропогенной нагрузки на водную экосистему. Установлено, что наибольшими коэффициентами накопления характеризуются погруженные виды макрофитов (*Ceratophyllum demersum*, *Myriophyllum spicatum*, *Potamogeton perfoliatus*), в связи с чем рекомендовано их использование в системе биомониторинга и фитоиндикации загрязнения водной среды тяжелыми металлами. По степени накопления в макрофитах исследуемые металлы можно расположить в ряд: Mn > Fe > Zn > Cu, Ni, Pb > Co > Cd.

Ключевые слова: тяжелые металлы, водная экосистема, загрязнение, водные макрофиты, аккумуляция, биомониторинг, фитоиндикация.

Большинство тяжелых металлов при поступлении в водную среду даже в относительно низких концентрациях могут накапливаться в тканях гидробионтов, создавая риск как для их нормального функционирования, так и для стабильности водной экосистемы в целом [17]. Макрофиты, которые являются важным компонентом водных экосистем и обладают значительным биоаккумуляционным потенциалом относительно тяжелых металлов, часто используются в системе контроля загрязнения водной среды как надежный показатель качества воды [20, 22, 26]. Анализ особенностей накопления металлов водными растениями необходим для всесторонней оценки степени загрязнения водной экосистемы [12, 13]. В системе мониторинга и биоиндикации загрязнения водоемов тяжелыми металлами рекомендуются использовать разные виды макрофитов [9, 15], среди которых погруженные водные растения *Ceratophyllum demersum* L., *Potamogeton pectinatus* L., *P. lucens* L., *P. perfoliatus* L., *Elodea canadensis* Michx. [10, 18, 21, 25].

Возможности биомониторинга с помощью таких высших водных растений, как *C. demersum*, *Echinochloa pyramidalis* (Lam.) Hitchc. & Chase, *Eichhor-*

© Е. А. Пасичная, Л. О. Горбатюк, О. М. Арсан, Н. А. Платонов,
С. П. Бурмистренко, О. А. Годлевская, А. Гопинат, 2019

nia crassipes (Mart.) Solms-Laub., *Myriophyllum spicatum* L., *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. и *Typha domingensis* (Pers.) Poir. ex Steud. были исследованы в работе [14]. Выявлено, что по способности к накоплению Cd, Cu, Pb и Zn, указанные виды растений можно расположить в ряд: *C. demersum* > *E. crassipes* > *M. spicatum* > *E. pyramidalis* > *T. domingensis* > *P. australis*.

Определение содержания тяжелых металлов (Fe, Pb, Cu, Zn, Ni и Mn) в водных макрофитах *E. crassipes*, *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle, *Cabomba furcata* Schult. & Schult.f., *Salvinia natans* (L.) All., *Nelumbo nucifera* Gaertn., *Pistia stratiotes* L. и концентраций этих металлов в воде дало возможность сделать вывод, что указанные водные растения можно использовать как фитоиндикаторы загрязнения водной среды тяжелыми металлами как при низких, так и при более высоких его уровнях. При этом некоторые виды могут быть индикаторами наличия определенных элементов, а другие — использоваться как фитоиндикаторы качества водной среды в целом (*E. crassipes*, *S. natans* и *N. nucifera*) [24].

Отмечают способность воздушно-водных макрофитов *T. domingensis*, *Ludwigia* sp. и *Paspalum vaginatum* Sw. к значительному накоплению Cd, As и Hg, тогда как плавающее водное растение *P. stratiotes* было лучшим накопителем Cd и As [16].

С целью оценки возможности использования распространенных видов высших водных растений Украины в системе мониторинга и фитоиндикации загрязнения водоемов тяжелыми металлами проводилось исследование особенностей их накопления макрофитами, относящимися к разным экологическим группам и произрастающими в условиях различной антропогенной нагрузки на водную экосистему.

Материал и методика исследований. Объектами исследований были: погруженные высшие водные растения (*Ceratophyllum demersum* L. — роголистник погруженный, *Myriophyllum spicatum* L. — уруть колосистая, *Potamogeton perfoliatus* L. — рдест пронзеннолистный); растения с плавающими листьями (*Nuphar lutea* (L.) Sm. — кубышка желтая, *Trapa natans* L. — водяной орех плавающий); воздушно-водные растения (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. — тростник обыкновенный, *Typha angustifolia* L. — рогоз узколистный).

Отбор растительного материала и проб воды проводили в 2017—2018 гг. на участках Каневского водохранилища в черте г. Киева: 500 м ниже зал. Верблюд (до основной городской застройки мегаполиса) и 700 м ниже залива возле ТЭЦ-5 (в районе промышленной зоны), которые имели различную степень антропогенной нагрузки.

В исследуемых точках отбирали растения каждого вида (побеги погруженных высших водных растений, плавающие листья *N. lutea* и *T. natans*, стебли и листья *Ph. australis* и *T. angustifolia*) с минимальными повреждениями. В лабораторных условиях их тщательно промывали водопроводной водой, очищали от эпифитона, еще раз промывали дистиллированной водой и высушивали до воздушно-сухой массы. Подготовку растительного материала для определения тяжелых металлов проводили путем его измельчения до порошкообразного состояния, досушивания при 60°C и мокрого озоления

смесью концентрированной азотной и серной кислот при нагревании [1, 2]. Определение содержания тяжелых металлов (Zn, Fe, Mn, Cu, Ni, Co, Pb, Cd) в озоленном материале проводили методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии [2].

Отобранные пробы воды фильтровали через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм, подкисляли концентрированной азотной кислотой (из расчета 12 см³ азотной кислоты на 1 дм³ воды) и сохраняли в пластиковых емкостях в холодильнике [3]. Определение концентрации растворенной формы металлов в воде проводили методом оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой [5, 7].

Коэффициент биологического накопления металлов определяли как отношение: содержание металла в растении (мг/кг сухой массы)/концентрация металла в воде (мг/дм³) [18, 23]. Статистическую обработку полученных данных проводили в MS Excel 2016.

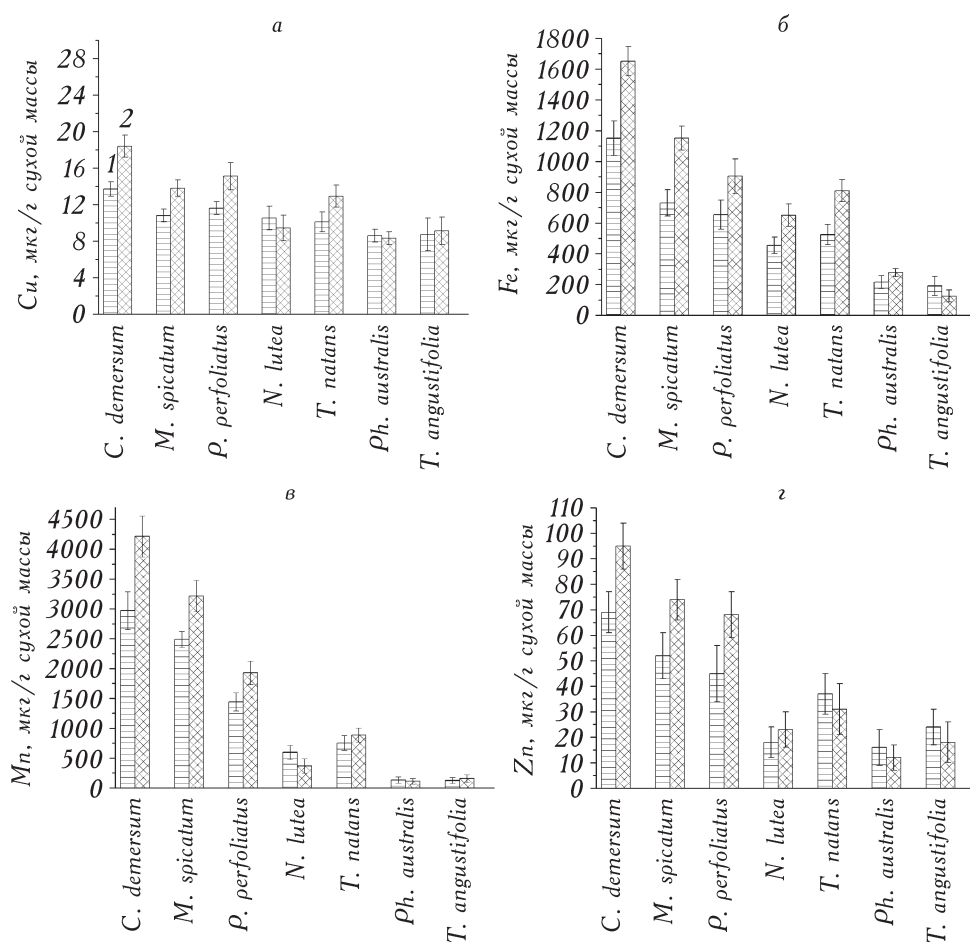
Результаты исследований и их обсуждение

В результате проведенных исследований было установлено, что в погруженных высших водных растениях *C. demersum*, *M. spicatum*, *P. perfoliatus*, отобранных в районе промышленной зоны, было аккумулировано меди на 28—34% больше, в *T. natans* — на 20% больше, чем в растениях, отобранных до основной городской застройки Киева (рис. 1, а). Превышение содержания железа обнаружено как в погруженных высших водных растениях (на 38—58%), так и в плавающих листьях *N. lutea* и *T. natans* (на 43 и 54% соответственно), а также в стеблях *Ph. australis* (на 29%) с участка Каневского водохранилища, расположенного в районе промышленной зоны, по сравнению с содержанием Fe в растениях, отобранных до основной городской застройки (рис. 1, б).

C. demersum, *M. spicatum* и *P. perfoliatus*, отобранные в районе промышленной зоны, также аккумулировали на 29—42% больше марганца и на 38—51% больше цинка по сравнению с соответствующими видами растений из точки отбора, расположенной выше г. Киева (рис. 1, в, г).

Также в растениях, произраставших на участке Каневского водохранилища в районе промышленной зоны, обнаружено повышенное содержание таких токсичных металлов, как свинец и кадмий. При этом содержание свинца в погруженных макрофитах из этой точки отбора превышало на 53—71%, а в растениях с плавающими листьями — на 60—66% его содержание в соответствующих видах растений, отобранных выше г. Киева (рис. 2, а). В *C. demersum* и *M. spicatum*, отобранных в районе промышленной зоны, оказалось на 28—38% больше кадмия по сравнению с его содержанием в растениях с участка водохранилища, расположенного до основной городской застройки мегаполиса (рис. 2, б).

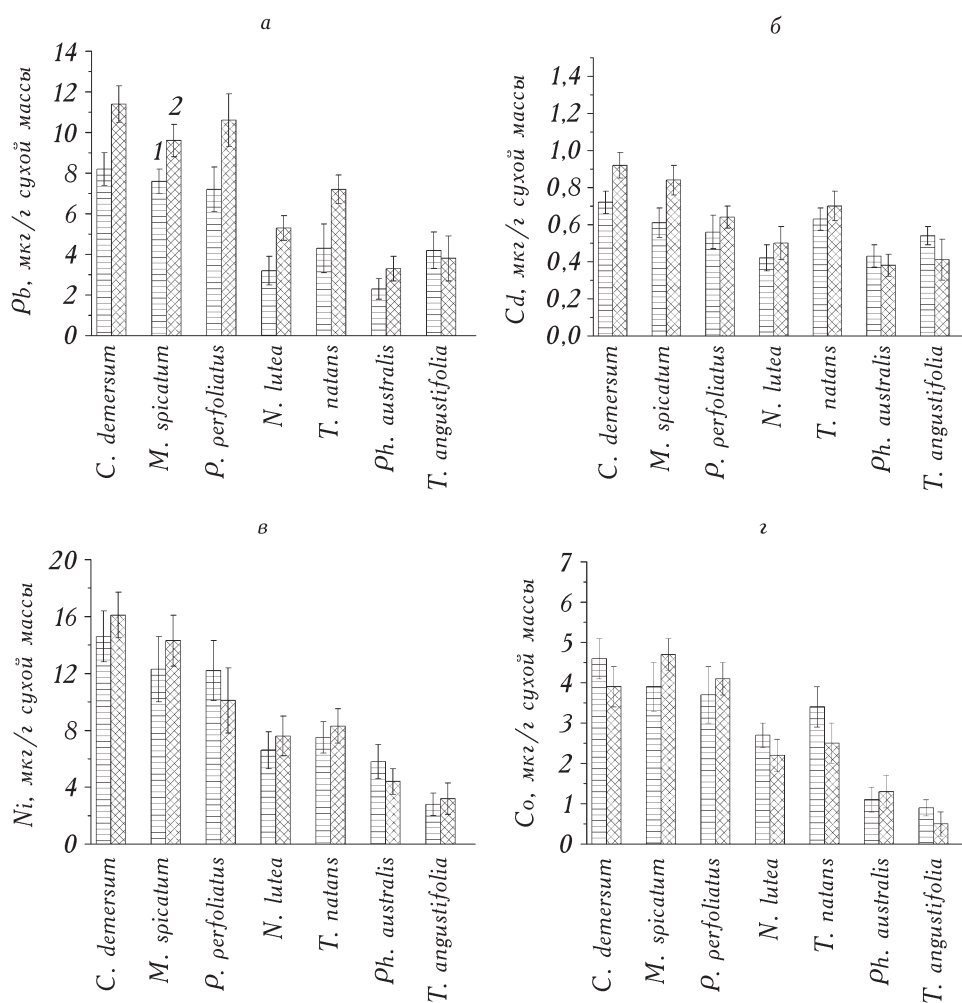
Относительно никеля и кобальта, то достоверной разницы в накоплении этих металлов макрофитами из обеих исследованных точек Каневского водохранилища не обнаружено (рис. 2, в, г).



1. Содержание меди (а), железа (б), марганца (в) и цинка (г) в водных макрофитах киевского участка Каневского водохранилища. Здесь и на рис. 2, 3: 1 — до основной городской застройки Киева; 2 — промышленная зона.

Доказано [4], что биодоступность и токсичность металлов для водных организмов в значительной степени зависят от их форм и количественного соотношения. При этом биодоступность металлов связывают с концентрацией их «свободных» ионов или аквакомплексов, а также гидроксокомплексов. Средние значения содержания растворенной формы металлов в воде исследованных участков Каневского водохранилища представлены на рисунке 3.

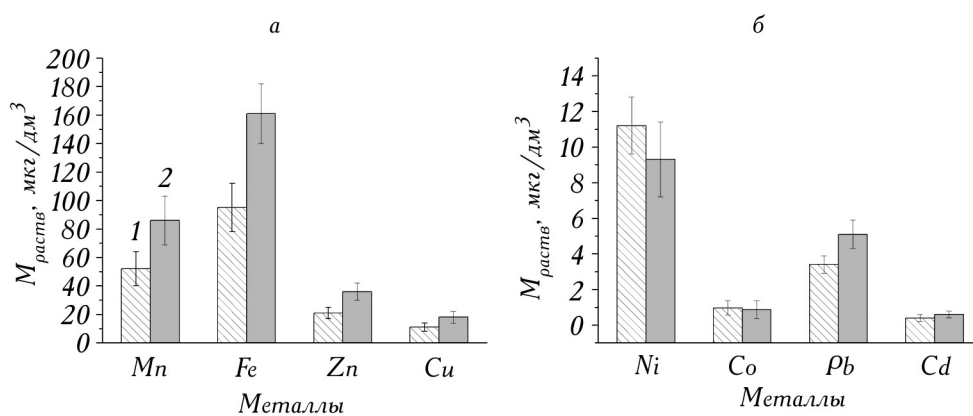
Исследования показали, что накопление металлов в водных макрофитах, особенно в погруженных высших водных растениях, в первую очередь зависит от их концентрации в воде, а также определяется значением металлов в физиолого-биохимических процессах растительных организмов и степенью их токсичности. Известно, что такие металлы, как Fe, Mn, Zn, Cu, Co, Ni, Cr в низких концентрациях являются необходимыми для роста растительных организмов микроэлементами, но проявляют токсичность при более



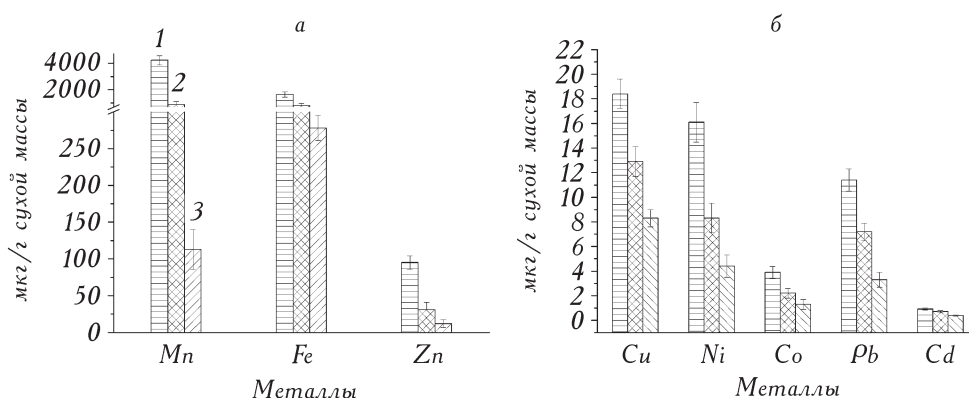
2. Содержание свинца (а), кадмия (б), никеля (в) и кобальта (г) в водных макрофитах киевского участка Каневского водохранилища.

высоких концентрациях [6, 24]. Другие металлы, такие как Cd, Pb, Hg, не имеют известной биологической функции [24, 27], но также могут быть аккумулированы в растениях. Накопление этих металлов в организме даже в относительно низкой концентрации приводит к нарушению физиолого-биохимических процессов [27].

В результате проведенных исследований выявлено, что водные макрофиты аккумулировали наибольшее количество марганца (113—4215 мкг/г сухой массы) и железа (180—1650 мкг/г сухой массы); меньше макрофиты накапливали цинк (12—95 мкг/г сухой массы) (рис. 4, а). Очевидно, что такие металлы, как медь, свинец, кобальт, никель, кадмий даже при незначительном превышении их концентрации в водной среде могут быть токсичными, поэтому их содержание в растениях колебалось в небольших пределах: Cu — 8,3—18,4 мкг/г сухой массы; Pb — 3,0—11,4 мкг/г сухой массы; Ni



3. Содержание растворенной формы металлов ($M_{\text{раств}}$) (а — Mn, Fe, Zn, Cu; б — Ni, Co, Pb, Cd) в воде киевского участка Каневского водохранилища.



4. Содержание тяжелых металлов (а — Mn, Fe, Zn; б — Cu, Ni, Co, Pb, Cd) в водных макрофитах киевского участка Каневского водохранилища в районе промышленной зоны: 1 — *C. demersum*; 2 — *T. natans*; 3 — *Ph. australis*.

— 2,8—16,1 $\mu\text{kg}/\text{g}$ сухой массы; Co — 0,5—4,7 $\mu\text{kg}/\text{g}$ сухой массы (рис. 4, б). В наименьшем количестве водные макрофиты накапливали Cd — 0,50—0,92 $\mu\text{kg}/\text{g}$ сухой массы, что, очевидно, связано с его высокой токсичностью.

На основании полученных нами данных был определен коэффициент биологического накопления (КБН), или коэффициент биоконцентрации исследуемых металлов водными макрофитами, который является одним из наиболее широко используемых критериев для оценки способности растений поглощать металлы [11, 23] (таблица). Очевидно, что КБН металлов для водных макрофитов характеризуются высокими значениями, однако имеются различия в зависимости от особенностей исследуемых металлов, их концентрации в воде, эколого-морфологических характеристик отдельных видов растений, а также от их способности накапливать и детоксифицировать определенные металлы [9, 19].

КБН металлов для водных макрофитов киевского участка Каневского водохранилища

| Металлы | <i>C. demersum</i> | <i>M. spicatum</i> | <i>P. perfoliatus</i> | <i>N. lutea</i> | <i>T. natans</i> | <i>Ph. australis</i> | <i>T. angustifolia</i> |
|---------|--------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|------------------|----------------------|------------------------|
| Mn | 49012— 57173 | 37395— 47923 | 22395— 27731 | 4244— 11462 | 10279— 14500 | 1314— 2538 | 1581—2385 |
| Fe | 10248— 12105 | 7143— 7684 | 5615— 6884 | 4037— 4789 | 5031— 5526 | 1727— 2274 | 783—2021 |
| Zn | 2639— 3286 | 2056— 2476 | 1889— 2143 | 639— 857 | 861— 1762 | 333— 762 | 500—1143 |
| Cu | 1022— 1245 | 767— 982 | 839— 1055 | 524— 956 | 673— 918 | 461— 782 | 507—794 |
| Pb | 3000— 3412 | 2529— 2667 | 2706— 2765 | 941— 1039 | 1324— 1412 | 647— 882 | 745—1235 |
| Co | 4535— 4792 | 4063— 5465 | 3854— 4767 | 2558— 2813 | 2907— 3542 | 1146— 1512 | 581—938 |
| Ni | 1304— 1731 | 1098— 1538 | 1086— 1089 | 589— 817 | 670— 892 | 473— 518 | 250—344 |
| Cd | 1533— 1800 | 1400— 1525 | 1067— 1400 | 833— 1050 | 1167— 1575 | 633— 1075 | 683—1350 |

Результаты исследований показали, что представители погруженных макрофитов (*C. demersum*, *M. spicatum*, *P. perfoliatus*) характеризуются наивысшими значениями коэффициента накопления. Способность погруженных растений к накоплению большего количества тяжелых металлов, очевидно, связана со значительной площадью их соприкосновения с водной средой, из которой они поглощают металлы всей своей поверхностью. Меньшее количество металлов аккумулировалось в плавающих листьях *T. natans* и *N. lutea*, а также в стеблях и листьях *Ph. australis* и *T. angustifolia*. Это связано с тем, что накопление металлов воздушно-водными растениями осуществляется, главным образом, корневой системой, где происходит аккумуляция и детоксикация основного количества ионов металлов, что препятствует их поступлению в стебли и листья и негативному воздействию на продукционные процессы [8].

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что накопление металлов водными макрофитами зависит от концентрации в водной среде и уровня токсичности конкретного металла, а также от эколого-морфологических характеристик отдельных видов растений и их способности аккумулировать и детоксицировать металлы. Среднее содержание металлов в исследованных макрофитах отражает последовательность: Mn > Fe > Zn > Cu, Ni, Pb > Co > Cd.

Показано, что значения коэффициента накопления металлов для водных макрофитов могут варьировать от сотен и тысяч (Cu, Zn, Co, Pb, Cd, Ni) до десятков

тысяч (Mn и Fe), что свидетельствует о высокой аккумуляционной способности водных растений.

По снижению величины коэффициента накопления металлов исследуемые макрофиты можно расположить в такой последовательности: *C. demersum* > *M. spicatum*, *P. perfoliatus* > *T. natans* > *N. lutea* > *Ph. australis*, *T. angustifolia*.

Исследования показали превышение содержания шести (Zn, Fe, Mn, Cu, Pb, Cd) металлов в макрофитах, главным образом в погруженных видах, из промышленной зоны по сравнению с их содержанием в растениях с участка Каневского водохранилища, расположенного до основной городской застройки Киева. Благодаря высокой аккумуляционной способности водных растений, накопление ими металлов является интегрированным показателем уровня загрязнения воды, что дает возможность оценить состояние водной среды не в конкретный момент, а за определенный промежуток времени.

В связи со способностью к накоплению значительного количества металлов погруженные макрофиты *C. demersum*, *M. spicatum* и *P. perfoliatus* могут быть рекомендованы к использованию в системе мониторинга и фитоиндикации загрязнения водной среды тяжелыми металлами, что дает определенные преимущества по сравнению с другими методами контроля, в частности благодаря доступности растительного материала и его быстрой регенерации.

Поскольку тяжелые металлы не способны к деструкции, а лишь перераспределяются между компонентами водной экосистемы, то накопление их значительного количества в первичных продуцентах (водных макрофитах) и дальнейшая передача по другим звеньям трофической цепи (моллюски, рыбы) представляет угрозу не только для биоты водной экосистемы, но и для человека. Таким образом, мониторинг содержания металлов с использованием первичных звеньев трофической цепи будет способствовать раннему выявлению загрязнений природных вод вблизи крупных мегаполисов и принятию мер по предотвращению деградации водных экосистем.

**

Досліджено акумуляцію важких металів водними макрофітами, які належать до різних екологічних груп. Показано, що рівень накопичення металів макрофітами відображає ступінь антропогенного навантаження на водну екосистему. Встановлено, що найбільшими коефіцієнтами накопичення характеризуються занурені види макрофітів (*Ceratophyllum demersum*, *Myriophyllum spicatum*, *Potamogeton perfoliatus*), у зв'язку з чим рекомендовано їхнє використання у системі біомоніторингу і фітоіндикації забруднення водного середовища важкими металами. За ступенем накопичення у макрофітах досліджувані метали можна розташувати у ряд: Mn > Fe > Zn > Cu, Ni, Pb > Co > Cd.

**

*The accumulation of heavy metals by aquatic macrophytes of different ecological groups has been investigated. It is shown that the level of accumulation of the metals by macrophytes reflects the degree of anthropogenic loading on the aquatic ecosystem. It was established that the largest accumulation coefficients are in submerged macrophytes species (*Ceratophyllum demersum*, *Myriophyllum spicatum*, *Potamogeton perfoliatus*), so they are*

recommended to use in the system of biomonitoring and phytoindication of heavy metals pollution of the aquatic environment. By the level of accumulation in macrophytes, the investigated metals can be arranged in the row: Mn > Fe > Zn > Cu, Ni, Pb > Co > Cd.

**

1. *Біохімічний аналіз водяних рослин.* — К.: Логос, 2009. — 372 с.
2. *Большой практикум по физиологии растений. Минеральное питание. Физиология клетки. Рост и развитие.* — М.: Высш. шк., 1978. — 408 с.
3. *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. [Електронний ресурс] / <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0030388-16>.
4. *Линник П.Н., Жежеря В.А., Линник Р.П.* Лабильность металлов в поверхностных водах как важная характеристика их потенциальной биодоступности (обзор) // *Гидробиол. журн.* — 2018. — Т. 54, № 4. — С. 3—28.
5. *Линник Р.П., Линник П.Н., Запорожец О.А.* Методы исследования сосуществующих форм металлов в природных водах (обзор) // *Методы и объекты химического анализа.* — 2006. — Т. 1, № 1. — С. 4—26.
6. *Линник П.Н., Набиванец Б.И., Брагинский Л.П.* Формы существования, основные закономерности превращений и биологическая роль соединений тяжелых металлов в природных водах // *Вод. ресурсы.* — 1987. — № 5. — С. 84—96.
7. *ЦКПП «Спектрометрический центр элементного анализа (СЦЭА)» при Национальном ботаническом саду им. Н.Н.Гришко НАН Украины* [Електронний ресурс] http://www.nbg.kiev.ua/ru/scientific_activity/scea
8. *Afrous A., Goudarzi Sh., Liaghat A.* Phytoremediation by some species of aquatic plants for As and Hg removal (case study: Dezful, Iran) // *Advances in Environmental Biology.* — 2011. — Vol. 11, N 5. — P. 3629—3635.
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. *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.
11. *El Falaky A.A., Abouloos S.A., Saoud A.A., Ali M.A.* Aquatic plants for bioremediation of waste water // *Eighth Intern. Water Technology Conf., Alexandria, Egypt, March 26—28, 2004.* — P. 361—376.
12. *El Zrelli R., Courjault-Radé P., Rabaoui L.* Biomonitoring of coastal pollution in the Gulf of Gabes (SE, Tunisia): use of *Posidonia oceanica* seagrass as a bioindicator and its mat as an archive of coastal metallic contamination // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* — 2017. — Vol. 24, N 28. — P. 22214—22225.
13. *Farias D.R., Hurd C.L., Eriksen R.S., Macleod C.K.* Macrophytes as bioindicators of heavy metal pollution in estuarine and coastal environments // *Mar. Pollut. Bull.* — 2018. — Vol. 128. — P. 175—184.
14. *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.
15. *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. [Электронный ресурс] <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4941-4>.
16. *Gbogbo F., Otoo S.D.* The concentrations of five heavy metals in components of an economically important urban coastal wetland in Ghana: public health and phytoremediation implications // *Environ. Monit. Assess.* — 2015. — Vol. 187, N 10. [Электронный ресурс] <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4880-0>.
 17. *Iha D.S., Bianchini I.Jr.* Phytoremediation of Cd, Ni, Pb and Zn by *Salvinia minima* // *Intern. J. Phytoremediation.* — 2015. — Vol. 17, N 10. — P. 929—935.
 18. *Kastratović V., Krivokapić A., Bigović M. et al.* Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Ceratophyllum demersum* from the Skadar Lake, Montenegro // *J. Serb. Chem. Soc.* — 2014. — Vol. 79, N 11. — P. 1445—1460.
 19. *Klochenko P.D., Kharchenko G.V., Zubenko I.B., Shevchenko T.F.* Some peculiarities of accumulation of heavy metals by macrophytes and epiphyton algae in water bodies of urban territories // *Hydrobiol. J.* — 2007. — Vol. 43, N 6. — P. 46—57.
 20. *Madsen J.D., Chambers P.A., James W.F. et al.* The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes // *Hydrobiologia.* — 2001. — Vol. 444. — P. 71—84.
 21. *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, N 1. — P. 39.
 22. *Materazzi S., Canepari S., Aquili S.* Monitoring heavy metal pollution by aquatic plants: a systematic study of copper uptake // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* — 2012. — Vol. 19, N 8. — P. 3292—3298.
 23. *Olguín E.J., Sánchez-Galván G.* Heavy metal removal in phytofiltration and phycoremediation: the need to differentiate between bioadsorption and bioaccumulation // *New Biotechnol.* — 2012. — Vol. 30, N 1. — P. 3—8.
 24. *Othman R., Hanifah N.Az.Bt., Shaharuddin R.I.* Aquatic plants as phytoindicator for heavy metals contaminant in polluted freshwater bodies // *Res. J. of Applied Sciences.* — 2014. — Vol. 9 (12). — P. 1225—1229.
 25. *Pasichna O.O.* Use of macrophytes for biomonitoring and purification of the aquatic environment at combined pollution by heavy metals // *Hydrobiol. J.* — 2013. — Vol. 49, N 6. — P. 72—79.
 26. *Schneider S., Melzer A.* Trophic index of macrophytes (TIM) — a new tool for indicating the trophic state of running waters // *Intern. Rev. Hydrobiol.* — 2003. — Vol. 88. — P. 49—67.
 27. *Tangahu B.V., Abdullah S.R.Sh., Basri H. et al.* A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation // *Intern. J. Chemical Engineering.* — 2011. [Электронный ресурс] <http://dx.doi.org/10.1155/2011/939161>.

¹ Институт гидробиологии НАН Украины, Киев

² Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев

³ Керальский университет рыбных и океанических исследований, Кочи, Индия