

**НАКОПЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ПЛЕЙСТОФИТОМ *HYDROCHARIS MORSUS-RANAE* L.  
В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ**

**Ширяев Г.И., Новиков П.Е., Малева М.Г., Борисова Г.Г.**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный государственный университет им. первого Президента  
России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия  
e-mail: schiriaev.grisha@yandex.ru

**Ключевые слова:** плавающий макрофит, токсическая нагрузка, аккумуляция металлов, транслокационный фактор, биомониторинг, фиторемедиация.

*Представлены результаты оценки аккумулятивной способности плейстофита *Hydrocharis morsus-ranae* L. (водокрас лягушачий или обыкновенный) по отношению к тяжелым металлам в условиях длительного загрязнения. Проведен сравнительный анализ двух локальных популяций *H. morsus-ranae* (фон и импакт) по содержанию металлов в листьях и корнях, коэффициентам биологического накопления и значениям транслокационного фактора. В большинстве случаев содержание металлов в корнях *H. morsus-ranae* было выше, чем в листьях. Уровень накопления металлов в листьях и корнях плавающего макрофита коррелировал с их концентрациями в пробах воды. Сделано заключение о перспективах использования данного вида при биомониторинге водных объектов, загрязненных металлами, и ризофилтрации поверхностных и сточных вод.*

**ACCUMULATION OF METALS BY PLEISTOPHYTE  
*HYDROCHARIS MORSUS-RANAE* L. UNDER TECHNOGENIC IMPACT**

**Shiryayev G.I., Novikov P.E., Maleva M.G., Borisova G.G.**

First President of Russia B.N. Yeltsin Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia e-mail:  
schiriaev.grisha@yandex.ru

**Keywords:** floating macrophyte, toxic load, metal accumulation, translocation factor, biomonitoring, phytoremediation

*The results of assessing the accumulative capacity of the pleistophyte *Hydrocharis morsus-ranae* L. (common frog's bit) in relation to heavy metals under conditions of prolonged impact are presented. A comparative analysis of two local populations of *H. morsus-ranae* (background and impact) by the metal content in the leaves and roots, the coefficients of biological accumulation and the values of the translocation factor were carried out. In most cases, the metal content in the roots of *H. morsus-ranae* was higher than in the leaves. The level of metal accumulation in the leaves and roots of a floating macrophyte correlated with their concentrations in water samples. The conclusion about the prospects of using this species in the bio/monitoring of water bodies contaminated with metals and rhizo/filtration of surface and waste water was made.*

Водные макрофиты играют важную роль в биогеохимических циклах тяжелых металлов (ТМ) и питательных веществ [1, 2]. Многие водные растения из-за высокой аккумулятивной способности по отношению к различным элементам, в том числе ионам ТМ, находят широкое применение в качестве биомониторов состояния водных экосистем [3].

Проблема загрязнения окружающей среды металлами особенно актуальна для промышленных регионов, включая Уральский регион, вследствие геохимических особенностей и активной деятельности горнодобывающих предприятий.

Лучшее понимание биогеохимических процессов, происходящих при участии водных макрофитов, является основой для восстановления экологического состояния гидроэкосистем и снижения рисков для здоровья.

В качестве объекта исследования выбран плейстофит семейства Hydrocharitaceae Juss. – *Hydrocharis morsus-ranae* L. (водокрас лягушачий, или обыкновенный). Это многолетнее, космополитное, свободноплавающее растение с многочисленными корнями, не закрепляющимися в субстрате. Листья с двумя прилистниками у основания черешка. Пластинка листа округлая, в основании широкосердцевидная [4]. Растение обладает высокой скоростью роста и вегетативного размножения, предпочитает воду, богатую кальцием, лучше всего растет в местообитаниях со слабым течением, таких как болота, речные заводи, озера и водохранилища [3].

Цель исследования – выявление особенностей накопления тяжелых металлов в разных органах *H. morsus-ranae* в условиях техногенной нагрузки.

Отбор образцов поверхностных вод, седиментов и растительного материала проводили на территории Челябинской области в середине июля 2018–2019 гг. на двух участках: фоновом и импактном.

В качестве фонового использовали прибрежно-водный участок оз. Иртыш. Это озеро-водохранилище расположено на восточном склоне Южного Урала в Каслинском районе Челябинской области и входит в систему Каслинско-Кыштымских озер.

В качестве импактного участка была выбрана заводь реки Егоза, которая является левым притоком р. Кыштым и относится к Иртышскому бассейновому округу. Длина реки составляет 17 км. Устье реки находится в Городском пруду города Кыштым. На его территории располагается ряд предприятий, таких как АО «Кыштымский медэлектродитный завод», АО «Кыштымское машиностроительное объединение». В результате выбросов загрязняющих веществ предприятиями в атмосферу загрязняющие вещества распространяются в окрестностях города.

Содержание ТМ в поверхностных водах, седиментах и растительном материале (корни, черешки, листья *H. morsus-ranae*) определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой после мокрого озоления 70 % HNO<sub>3</sub> (осч). В качестве интегрального показателя загрязнения воды и седиментов использовали суммарный индекс токсической нагрузки (*Si*), который рассчитывали по формуле [5]:  $Si = (1/n)\sum(C_i/C_{фон})$ , где  $C_i$  – концентрация металла в воде/седиментах загрязненного участка,  $C_{фон}$  – концентрация металла в воде/седиментах фонового участка,  $n$  – число исследованных металлов. Значение рН и удельной электропроводности поверхностных вод определяли с помощью рН-метра/кондуктометра (Hanna Instruments, Germany).

Для оценки накопления ТМ растениями использовали коэффициент биологического накопления (КБН), рассчитанный как отношение содержания металла в корнях/листьях растений к его содержанию в поверхностных водах. Значение транслокационного фактора (ТФ) металлов из корней в черешок рассчитывали, как отношение содержания металла в черешке к его содержанию в корнях, а из черешка в лист – как отношение содержания металла в листьях к его количеству в черешках.

Суммарный индекс токсической нагрузки на импактном участке (р. Егоза) рассчитывали по содержанию семи металлов (Zn, Fe, Mn, Co, Pb, Cu и Ni). Для поверхностных вод он составлял 2,3, а для седиментов – 1,9. При этом в воде увеличивалось содержание таких металлов, как Fe, Mn и Ni (в среднем в 4 раза), а в седиментах – Ni и Pb (в среднем в 3 раза). Содержание Co в загрязненной воде по сравнению с фоном также возрастало в несколько раз, но оставалось незначительным относительно других элементов (2,0 мкг/л). Удельная электропроводность водной среды на импактном участке была в 1,4 раза выше, чем на фоновом, в то время как по значению рН поверхностные воды исследованных участков достоверно не отличались (среда нейтральная).

По содержанию изученных ТМ в листьях *H. morsus-ranae* как на фоновом, так и импактном участках была выявлена следующая закономерность (рисунок):  $Mn > Fe > Zn > Ni > Cu > Pb > Co$ . Сходное распределение было характерно и для корней. В наименьших количествах в тканях *H. morsus-ranae* содержался Co, поскольку в пробах вод на исследованных участках его концентрация была незначительной. В большинстве случаев содержание ТМ в

корнях *H. morsus-ranae* было выше, чем в листьях, что показано и другими авторами [6]. Исключение составил цинк (у растений из оз. Иртяш) и марганец (у растений из р. Егоза).

На импактном участке растения *H. morsus-ranae* накапливали значительно большее количество ТМ, чем на фоновом участке (рисунок). Наибольшие различия между участками проявлялись по содержанию в листьях марганца (в 15 раз) и железа (в 6 раз). Данный факт объясняется повышенными концентрациями этих металлов в пробах воды из р. Егозы: их содержание в среднем в 4,5 раза превышало предельно допустимые значения для водных объектов рыбохозяйственного назначения. Более того, содержание Mn в листьях макрофита на импактном участке существенно (более чем в 5 раз) превышало токсичный уровень, отмеченный для большинства растений [7]. Положительная корреляция между концентрациями ТМ в поверхностных водах и их содержанием в органах *H. morsus-ranae* была отмечена и другими авторами [3, 8–10]. Следовательно, данный вид может эффективно использоваться при биомониторинге загрязнения водных объектов металлами.

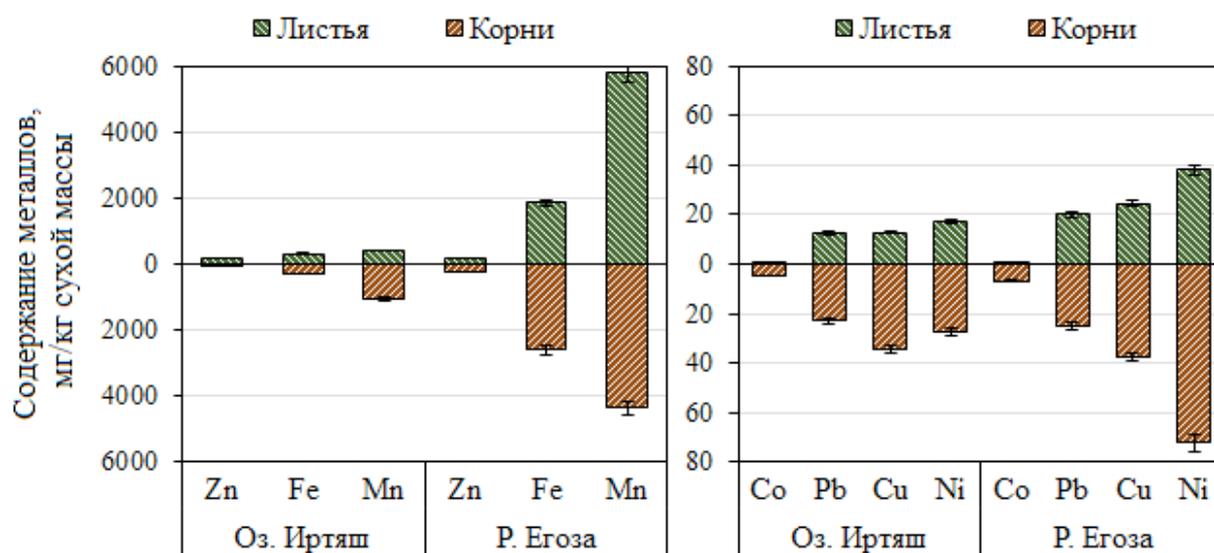


Рис. Содержание металлов в листьях и корнях *H. morsus-ranae*.

Как на фоновом, так и импактном участках, наибольшими значениями КБН выделялся марганец (табл. 1). Эта особенность была характерна для корней и листьев. Однако у *H. morsus-ranae* из оз. Иртяш величина КБН в отношении Mn в корнях была в 2,8 раза выше, чем в листьях, в то время как на импактном участке была отмечена обратная тенденция.

Табл. 1. Значения коэффициента биологического накопления (КБН) металлов в листьях и корнях *H. morsus-ranae*

Металл	оз. Иртяш		р. Егоза (заводь)	
	КБН, листья	КБН, корни	КБН, листья	КБН, корни
Zn	5705	3748	2507	4518
Fe	3137	3253	3499	4983
Mn	20280	57430	133189	101380
Co	722	10222	417	3271
Pb	2315	4222	6800	8367
Cu	661	1764	1051	1607
Ni	1922	2944	1418	2678

Достаточно высокая аккумулятивная способность *H. morsus-ranae* была выражена также по отношению к таким ТМ, как Zn, Fe и Pb. Имеются данные о способности этого макрофита накапливать в своих тканях Co [9]. Это подтверждается и результатами нашего исследования: несмотря на низкое содержание этого металла в растении (особенно в листьях) коэффициент биологического накопления составил в среднем 3658. В большинстве случаев минимальные значения КБН у изученных растений были отмечены по отношению к Cu.

Высокая аккумулятивная способность *H. morsus-ranae* по отношению к таким металлам, как Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Cu была показана и другими исследователями [3, 8–10]. Более того, Polechońska и Dambiec обнаружили [3], что содержание Mn, Fe и Cu в листьях *H. morsus-ranae* превышало средний уровень, отмеченный для других плавающих макрофитов, даже на участках, где содержание этих элементов в воде и седиментах было ниже геохимического фона. Это свидетельствует об активном накоплении ТМ данным видом и возможности его использования для фиторемедиации водных объектов.

По всем изученным металлам, за исключением цинка, значения ТФ из корней в черешок были ниже 1 (табл. 2), что является отражением преимущественного накопления ТМ в корнях растений. Что касается транслокации из черешка в лист, в большинстве случаев значения ТФ  $\geq 1$ , что свидетельствует об отсутствии или недостаточной развитости барьерных механизмов на границе черешок–лист. Как известно, у большинства плавающих и погруженных макрофитов слабо развиты механические и проводящие ткани [2], что не позволяет растению в должной степени регулировать процессы поглощения и транслокации даже токсичных элементов. Следует отметить, что для большинства металлов на импактном участке происходило увеличение значений ТФ в сравнении с фоном, что еще раз подтверждает сделанное нами предположение о слабом развитии барьерных механизмов у *H. morsus-ranae*.

**Табл. 2.** Значения транслокационного фактора (ТФ) металлов из корня в черешок и из черешка в лист у *H. morsus-ranae*

Металлы	Оз. Иртяш		Р. Егоза (заводь)	
	ТФ, корни→черешок	ТФ, черешок→лист	ТФ, корни→черешок	ТФ, черешок→лист
Cu	0,58	0,64	0,70	0,93
Ni	0,37	1,44	0,70	0,93
Zn	1,15	1,33	0,86	0,65
Mn	0,51	0,69	0,96	1,37
Pb	0,33	1,67	0,74	1,08
Fe	0,83	1,16	0,65	1,07
Co	0,04	1,58	0,09	1,40

Таким образом, проведенное исследование позволяет сделать вывод, что плейстофит *Hydrocharis morsus-ranae* обладает высокой аккумулятивной способностью по отношению к металлам, особенно Mn и Fe, большее количество которых накапливается в корнях. При повышенных техногенных нагрузках в большинстве случаев накопление металлов в органах макрофита возрастало. Следовательно, данный вид может эффективно использоваться как при ризофильтрации поверхностных и сточных вод при умеренных уровнях загрязнения, так и при биомониторинге водных объектов, загрязненных металлами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кокин К.А. Экология высших водных растений. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982. 160 с.
2. Ипатова В.И. Адаптация водных растений к стрессовым абиотическим факторам среды. М.: Изд-во ООО «Графикон-принт», 2005. 224 с.

3. *Polechońska L., Dambiec M.* Heavy metal accumulation in leaves of *Hydrocharis morsus-ranae* L. and biomonitoring applications // Civil and Environmental Engineering Reports. 2014. V. 12. № 1. P. 95–105.
4. *Лисицына Л.И., Панченков В.Г.* Флора водоемов России: Определитель сосудистых растений. М.: Наука, 2000. 237 с.
5. *Bezel V.S., Zhuikova T.V., Pozolotina V.N.* The structure of dandelion cenopopulations and specific features of heavy metal accumulation // Russian Journal of Ecology. 1998. Vol. 29. № 5. P. 331–337.
6. *Galczyńska M., Mańkowska N., Milke J., Buśko M.* Possibilities and limitations of using *Lemna minor*, *Hydrocharis morsus-ranae* and *Ceratophyllum demersum* in removing metals with contaminated water // Journal of Water and Land Development. 2019. № 40. P. 161–173.
7. *Kabata-Pendias A., Mukherjee A.B.* Trace elements from soil to human. Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 550 с.
8. *Polechońska L., Samecka-Cymerman A.* Bioaccumulation of macro- and trace elements by European frogbit (*Hydrocharis morsus-ranae* L.) in relation to environmental pollution // Environmental Science and Pollution Research. 2016. Vol. 23. P. 3469–3480.
9. *Polechońska L., Samecka-Cymerman A., Dambiec M.* Changes in growth rate and macroelement and trace element accumulation in *Hydrocharis morsus-ranae* L. during the growing season in relation to environmental contamination // Environmental Science and Pollution Research. 2017. Vol. 24. P. 5439–5451.
10. *Дайнеко Н.М., Тимофеев С.Ф., Жадько С.В.* Минимальное и максимальное накопление тяжелых металлов прибрежно-водной растительностью водоемов вблизи промышленного центра г. Речица // Бюллетень науки и практики. Электрон. журн. 2017. №2 (15). С. 99–109. Режим доступа: <http://www.bulletennauki.com/daineko-timofeev-zhadko> (дата обращения 15.02.2017).