

Особенности накопления тяжелых металлов в органах *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. Новосибирского водохранилища

Features of heavy metal accumulation in the organs of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. of the Novosibirsk Reservoir

Соколова М. И., Зарубина Е. Ю., Двуреченская С. Я.

Sokolova M. I., Zarubina E. Yu., Dvurechenskaya S. Ya.

Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул
E-mail: smi1181@mail.ru, zeur11@mail.ru, serafima_dv@mail.ru
Institute for Water and Environmental Problems SB RAN, Barnaul, Russia

Реферат. Настоящая работа посвящена изучению содержания тяжелых металлов в тростнике южном (*Phragmites australis*), доминирующем в Новосибирском водохранилище. В условиях усиливающегося техногенного воздействия на водные объекты высшая водная растительность играет важную роль в естественной очистке и может служить эффективным биоиндикатором загрязнения водоема. Цель исследования – оценка уровня накопления тяжелых металлов в различных органах *P. australis* и определение перспектив его использования для биомониторинга. В ходе работы в 2023 г. на шести мелководных участках водохранилища отобраны пробы растений; содержание элементов (Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Mo, Pb) определено методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения. Установлено, что накопление металлов в органах тростника варьирует в широких пределах и подчиняется определенным закономерностям: листья аккумулируют большинство элементов (Mn, Cr, Ni, Mo), соцветия – Fe, Cu, Zn, стебли – Pb. Наибольшее суммарное содержание металлов отмечено в Бердском и Ирменском заливах. Полученные данные подтверждают перспективность использования *P. australis* в качестве биоиндикатора при экологическом мониторинге водохранилищ.

Ключевые слова. Биомониторинг, водохранилище, тяжелые металлы, тростник южный, *Phragmites australis*.

Summary. The present work is devoted to the study of heavy metal content in common reed (*Phragmites australis*), which is dominant in the Novosibirsk Reservoir. Under conditions of increasing technogenic impact on water bodies, aquatic vegetation plays an important role in the natural purification and can serve as an effective bioindicator of pollution. The aim of the study is to assess the accumulation of heavy metals in different organs of *P. australis* and to determine the prospects for its use in biomonitoring. In 2023, plant samples were collected from six shallow areas of the reservoir; the content of elements (Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Mo, Pb) was determined by X-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation. It was found that metal accumulation in reed organs varies widely and follows certain patterns: leaves accumulate most elements (Mn, Cr, Ni, Mo), inflorescences – Fe, Cu, Zn, stems – Pb. The highest total metal content was found in Berdsky and Irmensky bays. The obtained data confirm the potential of using *P. australis* as a bioindicator for environmental monitoring of reservoirs.

Key words. Biomonitoring, heavy metals, *Phragmites australis*, reservoir.

Введение. В связи с усилением техногенного воздействия на водные объекты возрастает актуальность оценки их экологического состояния по содержанию тяжелых металлов в высшей водной растительности. Последняя играет ключевую роль в поддержании биотического баланса, формировании качества воды и гидрологического режима (Грищанцева и др., 2010). Сообщества прибрежно-водных растений аккумулируют тяжелые металлы на протяжении вегетационного периода, способствуя естественной фильтрации и сохранению качества воды (Бактыбаева и др., 2011).

Phragmites australis (Cav.) Trin. ex Steud. широко распространен по акватории Новосибирского водохранилища и обладает способностью к накоплению значительных количеств тяжелых металлов, что позволяет использовать его в качестве биоиндикатора загрязнения (Киприянова и др., 2009; Зарубина и др., 2014; Bonanno, Giudice, 2010; Minkina et al., 2018). Благодаря широкому распространению данный вид дает возможность провести равномерную оценку состояния всей акватории.

Цель работы – оценить содержание тяжелых металлов в *Phragmites australis* Новосибирского водохранилища для обоснования возможности его использования в качестве биоиндикатора.

Материалы и методы. Новосибирское водохранилище, созданное в 1957–1959 гг. на р. Обь, является крупнейшим искусственным водоемом равнинного типа многоцелевого назначения в Западной Сибири. Его акватория составляет 1070 км², протяженность – 185 км, наибольшая ширина – 22 км, максимальная глубина достигает 23 м при средней 9 м (Формирование ..., 1968). Уровень воды поддерживается на отметках НПУ (нормальный подпорный уровень) в среднем 126–128 дней в году с июня по сентябрь. Осенне-зимняя сработка уровня достигает 5 м. Воды гидрокарбонатно-кальциевые, минерализация в летний период составляет 190–240 мг/л, рН в период открытой воды колеблется в пределах 7,7–8,2 (Благовидова, 1969). По берегам водохранилища расположены многочисленные населенные пункты, сельскохозяйственные угодья, садоводческие некоммерческие товарищества и рекреационные зоны (санатории, детские лагеря, пляжи и др.).

Исследования проводили в 2023 г. в вегетационный период на мелководных участках Новосибирского водохранилища (рис. 1): Крутихинское мелководье, Чингисский, Шарапский, Ирменский, Бурмистровский и Бердский заливы.

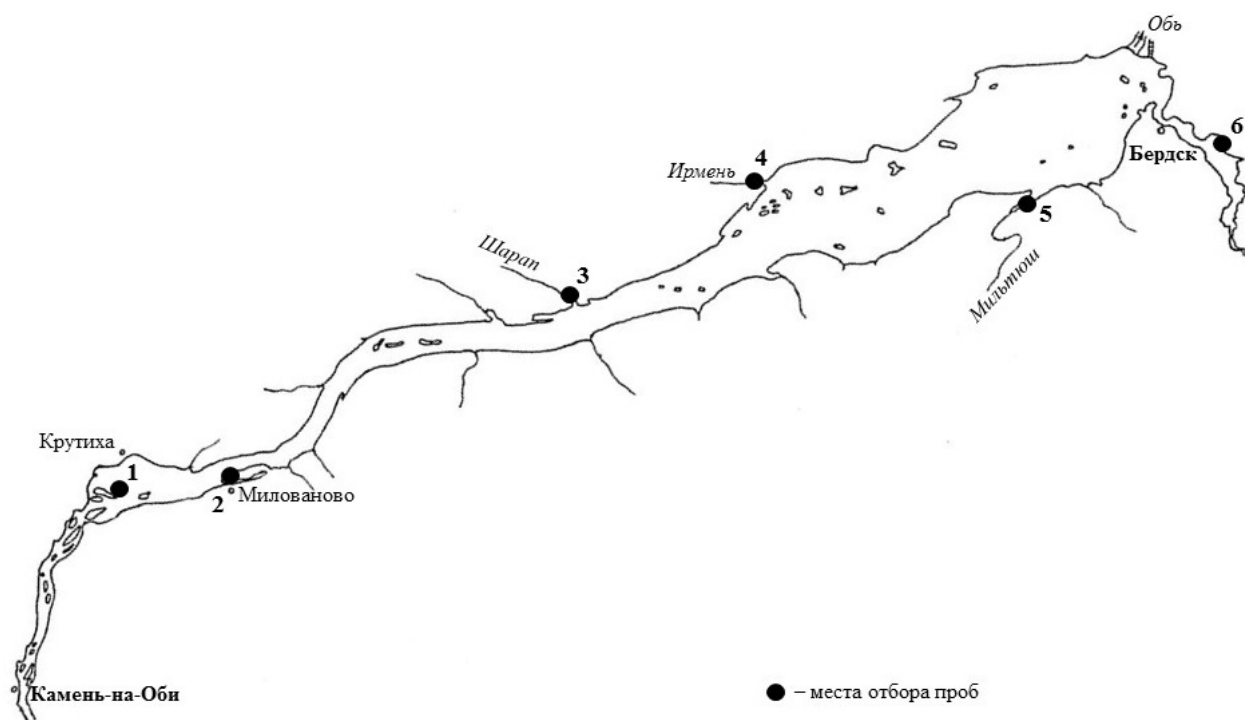


Рис. 1. Карта-схема Новосибирского водохранилища (1 – Крутихинское мелководье, 2 – Чингисский залив, 3 – Шарапский залив, 4 – Ирменский залив, 5 – Бурмистровский залив, 6 – Бердский залив).

Пробы растений (стебли, листья и соцветия) отбирали в нескольких местах на каждом исследуемом участке, затем промывали от гидробионтов и налета (песка, ила и других взвесей) и складывали в полиэтиленовые пакеты. В камеральных условиях образцы высушивали до воздушно-сухого, а затем до абсолютно-сухого состояния. Сухую пробу измельчали в лабораторной мельнице, после чего в агатовой ступке растирали до однородной консистенции.

Определение содержания химических элементов в высших водных растениях проводили методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА СИ) в Институте ядерной физики СО РАН (Piminov et al., 2016).

Статистическая обработка данных осуществлялась с помощью программ Microsoft Office Excel 2016, Statistica 6.0 и PAST (PALeontological Statistics Version 4.06).

Результаты. Проведенные исследования показали, что содержание тяжелых металлов в *Phragmites australis* Новосибирского водохранилища варьирует в широких пределах и достигает зна-

чительных концентраций (табл. 1). В среднем содержание металлов в тростнике уменьшалось в следующем ряду: $Mn > Fe > Zn > Cr > Mo > Cu > Pb > Ni$.

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов в органах *Phragmites australis* мг/кг сухого веса

Орган	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Mo	Pb
стебли	4,3±1,3	42,9±7,5	88,6±8,8	1,6±0,3	2,9±0,5	35,0±5,3	0,9±0,2	2,7±1,1
листья	6,9±1,2	308,3±67,4	183,3±19,3	2,0±0,4	5,0±0,7	25,1±1,2	10,0±3,9	2,2±1,5
соцветия	4,6±0,9	210±61,5	238,3±31,7	1,6±0,1	5,3±0,4	52,0±6,6	3,4±0,8	1,2±0,6

Сравнительный анализ концентрации тяжелых металлов в органах тростника южного показал, что большинство исследованных элементов (Mn, Cr, Ni, Mo) в наибольшей степени накапливаются в листьях; Fe, Cu, Zn – в соцветиях; Pb – в стеблях.

В целом концентрации элементов в органах *P. australis* убывают в следующем порядке: листья > соцветия > стебли. Суммарное содержание элементов в листьях в 2,5 раза выше, чем в стеблях.

Для Mn, Cr, Ni и Mo характерен следующий ряд накопления: лист > соцветие > стебель. Концентрации Cr и Ni в соцветиях и стеблях не имели значительных различий. Убывающий тренд концентраций Fe и Cu был иным: соцветия > стебель > лист. Различия в концентрациях Cu между соцветием и листом были минимальны. Стебель и лист показали сходные значения для Pb.

Для Mn, Fe, Zn и Mo все три органа продемонстрировали значительную дифференциальную аккумуляцию, что предполагает низкую подвижность этих элементов между органами.

Убывающий тренд концентраций металлов в различных органах выглядел следующим образом:

- в листьях: $Mn > Fe > Zn > Mo > Cr > Cu > Pb > Ni$;
- в стеблях: $Mn > Zn > Cr > Cu > Pb > Ni > Mo$;
- в соцветиях: $Fe > Mn > Zn > Cu > Cr > Mo > Ni > Pb$.

Оценка концентрации тяжелых металлов на исследуемых участках показала, что наибольшее суммарное содержание отмечено в Бердском и Ирменском заливах (рис. 2). На этих участках, как и на других, в наибольшей степени накапливаются Mn и Fe.

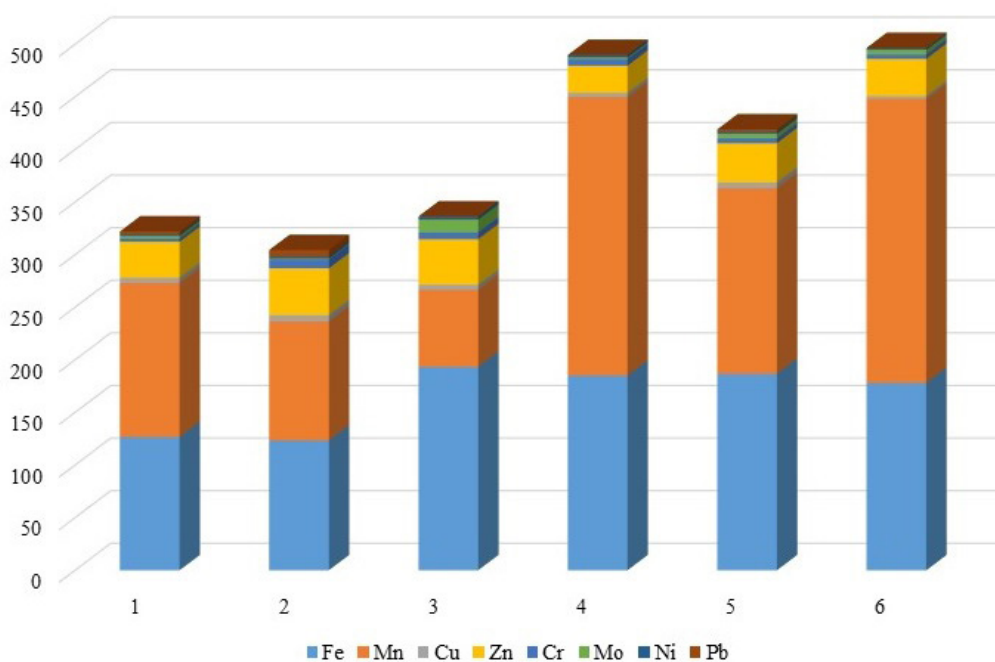


Рис. 2. Содержание тяжелых металлов в органах *Phragmites australis* на различных участках Новосибирского водохранилища. 1 – Крутихинское мелководье, 2 – Чингисский залив, 3 – Шарапский залив, 4 – Ирменский залив, 5 – Бурмистровский залив, 6 – Бердский залив.

Обсуждение. Полученные результаты свидетельствуют о неоднородности накопления тяжелых металлов в различных органах *Phragmites australis*, что связано с физиологическими особенностями растения и различиями в метаболической активности тканей. Более высокое содержание большинства элементов в листьях, вероятно, обусловлено их активной метаболической ролью и продолжительным периодом вегетации. Аккумуляция Fe, Cu и Zn в соцветиях может быть связана с репродуктивной функцией и повышенной потребностью в этих микроэлементах в период цветения. Наибольшие концентрации Pb в стеблях, по-видимому, объясняются ограниченной подвижностью этого элемента в растительных тканях.

Выявленные различия в содержании тяжелых металлов по участкам водохранилища (максимальные значения в Бердском и Ирменском заливах) согласуются с данными о более высокой антропогенной нагрузке в этих районах, что подтверждает чувствительность *P. australis* к уровню загрязнения.

Заключение. Содержание тяжелых металлов в органах *Phragmites australis* Новосибирского водохранилища варьирует в широких пределах и зависит как от элемента, так и от органа растения. В среднем элементы располагаются в следующий убывающий ряд: Mn > Fe > Zn > Cr > Mo > Cu > Pb > Ni. Выявлена четкая дифференциация накопления металлов по органам: листья аккумулируют преимущественно Mn, Cr, Ni и Mo; соцветия – Fe, Cu и Zn; стебли – Pb. Суммарное содержание элементов убывает в ряду: листья > соцветия > стебли. Пространственное распределение тяжелых металлов в *P. australis* характеризуется повышенными значениями в Бердском и Ирменском заливах, что, вероятно, обусловлено локальной антропогенной нагрузкой. По сравнению с исследованиями прошлых лет (Киприянова и др., 1995), в листьях *P. australis* зафиксировано снижение содержания Mn и Zn и повышение – Ni, Cu и Pb. В стеблях отмечено уменьшение концентрации Mn и Ni и увеличение Zn, Cu и Pb. Полученные результаты подтверждают перспективность использования *Phragmites australis* в качестве биоиндикатора при экологическом мониторинге Новосибирского водохранилища, а также возможность применения данного вида для оценки уровня загрязнения водоемов тяжелыми металлами в целом.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

- Бактыбаева З. Б., Суюндуков Я. Т., Ямалов С. М., Юнусбаев У. Б. Загрязнение тяжелыми металлами экосистемы реки Таналык, сообщества водных макрофитов и возможности их использования для биологической очистки / под ред. чл.-кор. АН РБ Б. М. Миркина. – Уфа: АН РБ, Гилем, 2011. – 208 с.
- Благовидова Л. А. Особенности распространения моллюсков в Новосибирском водохранилище // Вопросы малакологии Сибири. – Томск: ТГУ, 1969. – С. 113–116.
- Грищанцева Е. С., Сафронова Н. С., Кирпичникова Н. В., Федорова Л. П. Распределение микроэлементов в высшей водной растительности Ивановского водохранилища // Геоэкология. Инженерная геоэкология. Гидрогеология. Геоэкология, 2010. – № 3. – С. 223–231.
- Зарубина Е. Ю., Соколова М. И., Киприянова Л. М. Первичная продукция высшей водной растительности Новосибирского водохранилища. // Многолетняя динамика водно-экологического режима Новосибирского водохранилища. – Новосибирск, 2014. – С. 159–166.
- Киприянова Л. М., Зарубина Е. Ю., Соколова М. И. О современном состоянии высшей водной растительности Новосибирского водохранилища. // Мир науки, культуры, образования, 2009. – № 5 (17). – С. 19–22.
- Киприянова Л. М., Лащинский Н. Н., Березин М. В. Особенности накопления микроэлементов в высших водных растениях заливов Новосибирского водохранилища // Сибирский экологический журнал, 1995. – Т. 2, № 6. – С. 526–535.
- Формирование береговой зоны Новосибирского водохранилища. – Новосибирск: Наука, 1968. – 195 с.
- Bonanno G., Giudice R. Lo. Heavy metal bioaccumulation by the organs of *Phragmites australis* (common reed) and their potential use as contamination indicators // Ecological Indicators, 2010. – Vol. 10. – P. 639–645. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.11.002>
- Minkina T., Fedorenko G., Nevedomskaya D., Fedorenko A., Chaplygin V., Mandzhieva S. Morphological and anatomical changes of *Phragmites australis* Cav. due to the uptake and accumulation of heavy metals from polluted soils // Science of the Total Environment, 2018. – Vol. 636. – P. 392–401. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.005>
- Piminov P. A., Baranov G. N., Bogomyakov A. V. Synchrotron radiation research and application at VEPP-4 // Physics Procedia, 2016. – Vol. 84. – P. 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.11.005>