

Водные биоресурсы и среда обитания
2023, том 6, номер 3, с. 7–14
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online



Aquatic Bioresources & Environment
2023, vol. 6, no. 3, pp. 7–14
<http://journal.azniirkh.ru>, www.azniirkh.ru
ISSN 2618-8147 print, ISSN 2619-1024 online

Экологические проблемы и состояние водной среды

УДК 574.24:550.04:581.19

https://doi.org/10.47921/2619-1024_2023_6_3_7

EDN: BIWVYL



МАКРОФИТЫ РОДА *POTAMOGETON* — БИОИНДИКАТОРЫ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

А. С. Куанова¹, Н. В. Литвинова²,
Т. С. Ершова¹, В. Ф. Зайцев¹, Н. Г. Шабоянц³

¹ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет» (АГТУ),
Астрахань 414056, Россия

²ФГБУ «Астраханский ордена Трудового Красного Знамени государственный
природный биосферный заповедник», Астрахань 414021, Россия

³ФГБОУ ВО «Астраханский государственный медицинский университет» (АГМУ),
Астрахань 414000, Россия
E-mail: alina29-94@mail.ru

Аннотация. В работе проведено исследование содержания некоторых тяжелых металлов в составе рдестов, произрастающих в низовьях дельты реки Волги на территории Астраханского государственного заповедника. Высшая водная растительность способна извлекать химические элементы как из донных отложений, так и из водной толщи. При этом макрофиты, а именно представители рода *Potamogeton*, могут экстрагировать и накапливать химические элементы не только растворенные в воде, но и присутствующие во взвешенно-коллоидном материале водной массы и на поверхности листьев. Целью работы являлось выявление видовых особенностей типичных гидатофитов — растений рода *Potamogeton* — в накоплении тяжелых металлов. Концентрацию химических элементов в объектах исследования определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии, результаты обрабатывали статистически. Обнаружено, что все изученные виды растений в большей мере аккумулируют железо и марганец и в минимальных количествах — кобальт и кадмий. У изученных видов рдестов выявлены видовые особенности в накоплении химических элементов. Концентраторами железа являются *Potamogeton crispus* и *Potamogeton lucens*. При этом *Potamogeton lucens* является аккумулятором никеля, железа и марганца, а *Potamogeton pectinatus* — хрома, кобальта и свинца.

Ключевые слова: макрофиты, биоиндикаторы аккумуляции, накопление, тяжелые металлы, водные экосистемы, биомониторинг, дельта Волги

MACROPHYTES OF THE GENUS *POTAMOGETON* AS THE BIOINDICATORS FOR THE ACCUMULATION OF HEAVY METALS

A. S. Kuanova¹, N. V. Litvinova²,
T. S. Ershova¹, V. F. Zaytsev¹, N. G. Shaboyants³

¹FSBEI HE “Astrakhan State Technical University” (ASTU), Astrakhan 414056, Russia

²FSBI “Astrakhan State Biosphere Reserve named after Order of the Red Banner of Labour”,
Astrakhan 414021, Russia

³FSBEI HE “Astrakhan State Medical University” (ASMU), Astrakhan 414000, Russia

E-mail: alina29-94@mail.ru

Abstract. This work presents the investigation of the content of some heavy metals in the pondweeds of the Lower Volga River Delta within the area of Astrakhan State Biosphere Reserve. Higher aquatic plants extract chemical elements both from bottom sediments and water column. Moreover, the macrophytes, namely the representatives of *Potamogeton* genus, are capable of extraction and accumulation of the metals dissolved in the water, contained in the suspended colloidal particles, and present on the surface of leaves. This work is aimed at the identification of species-specific features of the typical hydrotophytes—aquatic plants of *Potamogeton* genus—pertaining to the accumulation of heavy metals. The content of chemical elements in the investigated specimens has been identified using atomic absorption spectrometry; the results have been processed with statistical methods. It has been found that all investigated plant species accumulate iron and manganese in the highest quantities and cobalt and cadmium in the lowest. The investigated pondweed species have shown species-specific properties in the accumulation of chemical elements. *Potamogeton crispus* and *Potamogeton lucens* are found to be iron concentrating species. *Potamogeton lucens* also accumulates nickel, iron and manganese, and *Potamogeton pectinatus* accumulates chrome, cobalt and lead.

Keywords: macrophytes, accumulation bioindicators, accumulation, heavy metals, aquatic ecosystems, biomonitoring, Volga River Delta

ВВЕДЕНИЕ

В связи с высокой техногенной нагрузкой на водоемы возрастает необходимость исследования их экологического состояния. Водные растения обладают способностью концентрировать определенные химические элементы из окружающей среды. В пресных водоемах одними из наиболее распространенных и весьма токсичных загрязнителей являются тяжелые металлы. Они по приоритетности занимают второе место после нефтяных углеводородов. Многие из них приводят к ухудшению качества воды и окружающей среды в целом, а также представляют опасность для здоровья человека [1, 2]. Растения в большей мере концентрируют железо, марганец и цинк, которые являются эссенциальными, т. е. необходимыми для их жизнедеятельности.

В отличие от органических загрязняющих веществ, подверженных деструкции, тяжелые металлы лишь перераспределяются между отдельными компонентами водных экосистем — водой, донными отложениями, биотой [3]. Растительный мир дельты р. Волги богат и разнообразен, играет

важную роль в водной экосистеме. Известно, что высшие водные растения являются идеальными индикаторами загрязнения водной среды, и с их помощью можно оценить степень загрязнения водоема тяжелыми металлами. По мнению исследователей, в местах развития макрофитов резко усиливается биогеохимическая трансформация речного стока, важная роль в которой принадлежит процессам биологического концентрирования растворенных форм микроэлементов [4].

Способность высшей водной растительности реагировать на изменения среды обитания и концентрировать в себе вещества дает возможность использовать макрофиты в системе мониторинга для контроля водных экосистем. Одними из наиболее распространенных растений в пресных водоемах являются представители рода *Potamogeton* [5, 6].

Высшая водная растительность извлекает химические элементы как из донных отложений, так и из водной толщи. При этом макрофиты, а именно представители рода *Potamogeton*, способны извлекать и накапливать металлы не только

растворенные в воде, но и присутствующие во взвешенно-коллоидном материале водной массы и на поверхности листьев [7].

Рдесты относятся к группе погруженных растений. Известно, что погруженные растения накапливают металлы в больших количествах, нежели полупогруженные [8, 9]. Данные об их содержании важны для проведения мониторинга экологического состояния водных экосистем. Наличие некоторых микроэлементов в растениях дает возможность судить о возможном присутствии в среде биодоступных форм металлов, которые могут оказывать токсическое воздействие на водные организмы [10].

Цель работы — выявить видовые особенности растений рода *Potamogeton* в накоплении тяжелых металлов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования явились пять видов рдеста рода *Potamogeton*: рдест курчавый (*Potamogeton crispus* L., 1753), рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus* L., 1753), рдест блестящий (*Potamogeton lucens* L., 1753), рдест гребенчатый (*Potamogeton pectinatus* L., 1753) и рдест узловатый (*Potamogeton nodosus* Poiret, 1816). В рдестах определялось содержание таких тяжелых металлов, как медь, цинк, марганец, кобальт, никель, железо, хром, кадмий и свинец. Отбор проб растений осуществлялся в водотоках на Дамчикском участке Астраханского государственного заповедника (рисунок).

Для анализа использовали листья высшей водной растительности. Исследованные виды растений промывали водой и высушивали. Сухие



Дамчикский участок Астраханского государственного заповедника
Damchik sector of the Astrakhan State Biosphere Reserve

пробы измельчали до состояния порошка при помощи пестика и ступки и помещали в колбу Кьельдаля $V=10 \text{ см}^3$, куда добавляли 5 см^3 концентрированной азотной кислоты. После суточной экспозиции колбы устанавливали на песчаную баню. Контролируя процесс нагревания, пробу доводили до кипения таким образом, чтобы не происходила потеря жидкости. Раствор кипятили до полного осветления, а затем фильтровали через бумажный фильтр типа «синяя лента» плотностью 80 г/м^2 в аналитическую пробирку с притертой крышкой $V=20 \text{ см}^3$. Полученный раствор доводили 1%-ным раствором азотной кислоты до объема $15\text{--}20 \text{ см}^3$.

Параллельно с исследуемой пробой готовили холостую пробу. Пробы хранили в хорошо проветриваемом помещении до момента определения содержания химических элементов.

Определение металлов проводилось методом атомно-абсорбционной спектроскопии согласно методикам ПНД Ф 14.1:2.4.214-06, ПНД Ф 16.2.2:2.3.71-2011 и ГОСТ 30178-96.

Концентрацию химических элементов в объектах исследования определяли на кафедре «Гидробиология и общая экология» ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», используя метод атомно-абсорбционной спектроскопии с применением атомно-абсорбционного спектрометра с электротермической атомизацией МГА-915 МД [11].

Расчет массовой доли тяжелого металла проводили по формуле:

$$m = \frac{(C_k - C_x) \cdot V \cdot K}{p},$$

где C_k — концентрация элемента в рабочем растворе, мг/кг;

C_x — концентрация элемента в холостой пробе, г/кг;

V — исходный объем испытуемого раствора, см^3 ;

K — коэффициент разбавления;

p — навеска пробы, кг.

Содержание химических элементов выражали в мг/кг сухого веса.

Результаты исследования обработаны статистически при помощи программного продукта Microsoft Excel 2010. При обработке полученного материала использованы следующие статистические показатели: определение средней арифметической (M) и стандартного отклонения (S), оценка достоверности различий по t -критерию Стьюдента

с учетом уровня значимости (p), рассчитанного для двух сравниваемых значений. Достоверными считали различия между двумя сравниваемыми массивами данных, если уровень значимости был менее $0,05$ ($p < 0,05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из табл. 1 видно, что во всех исследованных видах рдестов рода *Potamogeton*, произрастающих в низовьях дельты Волги, преобладающим тяжелым металлом было железо. Возможно, это связано с тем, что железо входит в состав ферментов, катализирующих процессы кислородного обмена у водных растений [12].

По сравнению с другими исследованными видами рдестов, *Potamogeton crispus* и *Potamogeton lucens* отличались наибольшим содержанием железа ($368,41 \pm 6,3$ и $362,02 \pm 6,8$ мг/кг сухого вещества). Различия в значениях аккумуляции железа *Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton pectinatus* и *Potamogeton nodosus* недостоверны ($p > 0,05$).

Марганец является жизненно важным химическим элементом, обладающим каталитической активностью в биологических кластерах, и влияет на рост и развитие растений [12, 13]. По своему содержанию в исследованных видах растений он занимает второе место после железа. Можно предположить, что фактором, определяющим высокие концентрации марганца в растениях, является интенсивность его потребления при фотосинтезе, особенно в режиме недостаточной освещенности, характерной для зарослей дельтовых акваторий Нижней Волги. Разложение фитопланктона, микроорганизмов и высшей водной растительности способствует переходу марганца в растворимые формы из нерастворимых, доступных для растений [14]. Ранее А.Б. Имантаевым и Н.Ю. Чесноковой также отмечались высокие концентрации марганца в исследованных ими растениях Северного Каспия [15]. Наибольшие концентрации марганца зафиксированы в *Potamogeton lucens* ($330,84 \pm 2,7$ мг/кг сухого вещества). Минимальные значения концентрации марганца были отмечены в *Potamogeton nodosus*, причем это значение почти в 4 раза меньше, чем у *Potamogeton lucens*.

Отмечено, что помимо марганца *Potamogeton lucens* является также аккумулятором никеля ($19,78 \pm 1,2$ мг/кг сухого вещества).

Potamogeton pectinatus, в отличие от других видов, в наибольших количествах аккумулирует

Таблица 1. Содержание химических элементов в представителях рода *Potamogeton* дельты Волги (мг/кг сухого вещества)

Table 1. Content of chemical elements in representatives of the genus *Potamogeton* of the Volga River Delta (mg/kg dry matter)

Химический элемент Chemical element	Рдест курчавый Curly pondweed <i>Potamogeton crispus</i>	Рдест пронзеннолистный Perfoliate pondweed <i>Potamogeton perfoliatus</i>	Рдест блестящий Shining pondweed <i>Potamogeton lucens</i>	Рдест гребенчатый Sago pondweed <i>Potamogeton pectinatus</i>	Рдест узловоый Long-leaved pondweed <i>Potamogeton nodosus</i>
Cu	5,21±0,4	7,81±0,2	6,29±0,3	5,45±0,3	2,77±0,5
Zn	15,85±3,2	14,45±1,1	9,67±2,5	9,57±3,1	12,24±2,4
Cr	1,45±1,8	2,68±1,2	5,49±0,4	39,83±0,2	1,62±0,3
Ni	10,69±1,1	15,6±1,0	19,78±1,2	7,5±0,7	6,46±0,8
Fe	368,41±6,3	329,18±5,3	362,02±6,8	325,16±7,2	339,93±8,3
Co	0,27±0,2	2,96±1,2	3,18±0,3	14,25±0,9	1,78±0,2
Mn	136,6±2,3	235,61±4,2	330,84±2,7	132,44±4,9	82,18±7,6
Cd	0,73±0,1	0,85±0,1	0,6±0,1	0,32±0,1	0,26±0,1
Pb	11,86±1,1	15,16±1,0	14,56±0,7	32,31±1,0	2,86±0,8

хром (39,83±0,2 мг/кг сухого вещества), кобальт (14,25±0,9 мг/кг сухого вещества) и свинец (32,31±1,0 мг/кг сухого вещества).

Potamogeton perfoliatus отличался большими концентрациями меди (7,81±0,2 мг/кг сухого вещества).

Выявленные различия в содержании цинка в изученных видах рдестов недостоверны ($p>0,05$).

Концентрация кадмия в *Potamogeton crispus*, *Potamogeton perfoliatus* и *Potamogeton lucens* варьировала в пределах от 0,6±0,1 до 0,85±0,1 мг/кг сухого вещества, при этом выявленные различия недостоверны ($p>0,05$). Содержание этого металла в *Potamogeton pectinatus* и *Potamogeton nodosus* в 2 раза меньше, чем у рассмотренных ранее видов.

Содержание свинца в *Potamogeton crispus*, *Potamogeton perfoliatus* и *Potamogeton lucens* также находилось примерно на одном уровне и составляло 11,86±1,1; 15,16±1,0 и 14,56±0,7 мг/кг сухого вещества соответственно. Аккумулятором свинца являлся *Potamogeton pectinatus*, значение показателя у которого в 2 раза выше, чем у *Potamogeton crispus*, *Potamogeton perfoliatus* и *Potamogeton*

lucens. *Potamogeton nodosus* характеризовался наименьшим содержанием этого металла (2,86±0,8 мг/кг сухого вещества).

Среди исследованных видов рода *Potamogeton* стоит выделить *Potamogeton nodosus*, который отличался небольшими концентрациями изученных металлов при одинаковых условиях существования; возможно, именно этот вид рдестов способен регулировать поступление металлов в свой организм и, в связи с этим, обладает большей экологической устойчивостью.

По уровню содержания тяжелых металлов в различных видах рдестов можно построить следующие убывающие ряды:

Potamogeton crispus: Fe>Mn>Zn>Pb>Ni>Cu>Cr>Cd>Co

Potamogeton perfoliatus: Fe>Mn>Ni>Pb>Zn>Cu>Co>Cr>Cd

Potamogeton lucens: Fe>Mn>Ni>Pb>Zn>Cu>Cr>Co>Cd

Potamogeton pectinatus: Fe>Mn>Cr>Pb>Co>Zn>Ni>Cu>Cd

Potamogeton nodosus: Fe>Mn>Zn>Ni>Pb>Cu>Co>Cr>Cd.

Таким образом, наиболее интенсивно высшей водной растительностью из воды извлекаются железо, марганец, цинк, никель и медь, активное накопление которых, вероятно, связано с их участием в процессах метаболизма. Эти химические элементы входят в состав пигментов, витаминов, ферментов [12]. А.Б. Иммантаевым в *Zostera marina* Северного Каспия также отмечены преобладающие химические элементы, такие как железо, марганец, цинк и медь [16].

В табл. 2 представлен сравнительный анализ содержания некоторых тяжелых металлов в *Potamogeton perfoliatus* и *Potamogeton lucens*, произрастающих в дельте Волги и Волгоградском водохранилище [17].

На основании данных, представленных в табл. 2, видно, что концентрация тяжелых металлов в растениях Волгоградского водохранилища выше, чем у таковых в водотоках Астраханского государственного заповедника. Так, например, *Potamogeton perfoliatus* в Волгоградском водохранилище концентрирует в себе в 4 раза больше цинка, чем в дельте Волги, в 9 раз больше меди и кадмия и почти в 2 раза — кобальта. В отношении *Potamogeton lucens* выявлена аналогичная картина: содержание кобальта и цинка в растениях Волгоградского водохранилища в 3–5 раз, а меди и кадмия — в 12–14 раз выше, чем в дельте Волги.

Большие концентрации тяжелых металлов в макрофитах приурочены к участкам с повышен-

Таблица 2. Содержание некоторых тяжелых металлов в рдестах, произрастающих в Волгоградском водохранилище и дельте Волги (мг/кг сухого вещества)

Table 2. Content of some chemical elements in pondweeds growing in the Volgograd Reservoir and the Volga River Delta (mg/kg dry matter)

Химические элементы Chemical elements	Рдест пронзеннолистный Perfoliate pondweed <i>Potamogeton perfoliatus</i>		Рдест блестящий Shining pondweed <i>Potamogeton lucens</i>	
	Волгоградское водохранилище Volgograd Reservoir	Дельта Волги Volga River Delta	Волгоградское водохранилище Volgograd Reservoir	Дельта Волги Volga River Delta
Zn	58±3,5	14,45±1,1	58±5,5	9,67±2,5
Cu	75±4,1	7,81±0,2	76±8,8	6,29±0,3
Co	5,2±0,4	2,96±1,2	6,8±0,4	3,18±0,3
Cd	7,5±0,8	0,85±0,1	8,7±0,6	0,6±0,1

ной антропогенной нагрузкой, где наблюдается увеличение общей минерализации воды, а также повышенное их содержание в донных отложениях. Антропогенное воздействие на экосистему Волгоградского водохранилища на протяжении последних десятилетий сохраняется на высоком уровне [18], в отличие от водотоков Астраханского государственного заповедника. Высокая антропогенная нагрузка способствует увеличению содержания тяжелых металлов в водной растительности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований было определено содержание некоторых тяжелых металлов (железо, марганец, цинк, медь, никель, кобальт, хром, кадмий, свинец) в составе рдестов, произ-

растающих в водотоках Астраханского государственного заповедника. Отмечено, что все изученные виды растений в большей мере аккумулируют железо и марганец и в минимальных количествах — кобальт и кадмий.

У изученных видов рдестов выявлены видовые особенности в накоплении тяжелых металлов. Так, концентраторами железа являются *Potamogeton crispus* и *Potamogeton lucens*. При этом *Potamogeton lucens* также является аккумулятором никеля, железа и марганца, а *Potamogeton pectinatus* — хрома, кобальта и свинца.

Результаты исследования показали, что формация рдестов является групповым концентратором тяжелых металлов, а следовательно, все изученные виды макрофитов могут использоваться в качестве объекта биомониторинга для оценки

экологического состояния дельты Волги и других водных экосистем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 23–24–10043.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Башаркевич И.Л., Онищенко Т.Л., Павлова Л.Н., Трефилова Н.Я., Ачкасов А.И., Саркисян С.Ш. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
2. Садчиков А.П., Кудряшов М.А. Гидробиотаника: прибрежно-водная растительность. М.: Юрайт, 2022. 254 с.
3. Федоров В.Д. Биологический мониторинг: обоснование и опыт организации // Гидробиологический журнал. 1975. Т. 11, № 5. С. 5–11.
4. Чуйко Е.В., Абдусаматов А.С. Особенности миграции тяжелых металлов в экосистеме Северного Каспия // Юг России: экология, развитие. 2013. Т. 8, № 3. С. 110–116. doi: 10.18470/1992-1098-2013-3-110-116.
5. Загрязняющие вещества в водах Волжско-Каспийского бассейна / Под ред. В.Ф. Бреховских, Е.В. Островской. Астрахань: Астраханская цифровая типография Сорокина Романа Васильевича, 2017. С. 236–251.
6. Островская Е.В., Бреховских В.Ф., Волкова З.В., Монахов С.К., Курапов А.А., Кочарян А.Г. Тяжелые металлы в системе «Дельта Волги – Северный Каспий» // Юг России: экология, развитие. 2008. Т. 3, № 4. С. 133–139. doi: 10.18470/1992-1098-2008-4-136-163.
7. Янин Е.П. Техногенные речные илы в зоне влияния промышленного города (формирование, состав, геохимические особенности). М.: Изд-во Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, 2002. 100 с.
8. Березовская В.А. Макрофитобентос как показатель состояния среды в прибрежных водах Камчатки : дис. ... докт. геогр. наук. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камчатского государственного технического университета, 2002. 364 с.
9. Бессонова В.П., Иванченко О.Е. Накопление хрома в растениях и его токсичность // Питання біоіндикації та екології. 2011. Вып. 16-2. С. 35–52.
10. Христофорова Н.К. Биоиндикация и мониторинг загрязнения морских вод тяжелыми металлами. Л.: Наука, 1989. 192 с.
11. Брицке М.Э. Атомно-адсорбционный спектрохимический анализ (методы аналитической химии). М.: Химия, 1982. 223 с.
12. Войнар А.И. Биологическая роль микроэлементов в организме животных и человека. М.: Высшая школа, 1960. 544 с.
13. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 272 с.
14. Воробьев Е.В., Усова Е.В., Орехова Ю.В. Анализ динамики и источников поступления ионов марганца, меди, никеля и алюминия в трансграничную реку Миус в период с 2003 по 2017 годы // Юг России: экология, развитие. 2019. Т. 14, № 1. С. 81–93. doi: 10.18470/1992-1098-2019-1-81-93.
15. Имантаев А.Б., Чеснокова Н.Ю. Содержание тяжелых металлов в высших водных растениях Северного Каспия // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 1. С. 87–96. doi: 10.35567/19994508_2022_1_6.
16. Имантаев А.Б. Содержание микроэлементов в *Zostera marina* (Linnaeus, 1753) в Северном Каспии в 2018–2020 гг. // Водные биоресурсы и среда обитания. 2022. Т. 5, № 3. С. 24–31. doi: 10.47921/2619-1024_2022_5_3_24.
17. Фомина А.А., Тихомирова Е.И., Кораблева А.И. Анализ содержания тяжелых металлов в высших водных растениях Волгоградского водохранилища в районе агломерации Саратов-Энгельс // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 2 (3). С. 822–827.
18. Пучков М.Ю., Зволинский В.П., Новиков В.В., Кочеткова А.И., Локтионова Е.Г. Особенности накопления тяжелых металлов высшей водной растительностью Волгоградского водохранилища // Фундаментальные исследования. 2013. № 6-2. С. 392–396.

REFERENCES

1. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Smirnova R.S., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Trefilova N.Ya., Achkasov A.I., Sarkisyan S.Sh. Geokhimiya okruzhayushchey sredy [Geochemistry of environment]. Moscow: Nedra [Earth's Interior], 1990, 335 p. (In Russian).
2. Sadchikov A.P., Kudryashov M.A. Gidrobotanika: pribrezhno-vodnaya rastitel'nost' [Hydrobotany: Coastal-aquatic vegetation]. Moscow: Yurayt [Urite], 2022, 254 p. (In Russian).
3. Fedorov V.D. Biologicheskii monitoring: obosnovanie i opyt organizatsii [Biological monitoring: background and experience of organization]. *Gidrobiologicheskii zhurnal* [Hydrobiological Journal], 1975, vol. 11, no. 5, pp. 5–11. (In Russian).
4. Chuyko E.V., Abdusamadov A.S. Osobennosti migratsii tyazhelykh metallov v ekosisteme Severnogo Kaspiya [Features of migration of heavy metals in the Northern Caspian ecosystem]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie*

- [*The South of Russia: Ecology, Development*], 2013, vol. 8, no. 3, pp. 110–116. doi: 10.18470/1992-1098-2013-3-110-116. (In Russian).
5. Zagryaznyayushchie veshchestva v vodakh Volzhsko-Kaspiyskogo basseyna [Pollutants in the waters of the Volga-Caspian Basin]. V.F. Brekhovskikh, E.V. Ostrovskaya (Eds.). Astrakhan: Astrakhanskaya tsifrovaya tipografiya Sorokina Romana Vasilyevicha [R.V. Sorokin's Astrakhan Digital Printing Office], 2017, 408 p. (In Russian).
 6. Ostrovskaya E.V., Brekhovskikh V.F., Volkova Z.V., Monakhov S.K., Kurapov A.A., Kocharyan A.G. Tyazhelye metally v sisteme "Del'ta Volgi – Severnyy Kaspiy" [Heavy metals in system "Delta of Volga – Northern Caspian Sea"]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye* [*The South of Russia: Ecology, Development*], 2008, vol. 3, no. 4, pp. 133–139. doi: 10.18470/1992-1098-2008-4-156-163. (In Russian).
 7. Yanin E.P. Tekhnogennyye rechnyye ily v zone vliyaniya promyshlennogo goroda (formirovaniye, sostav, geokhimiicheskiye osobennosti) [Technogenic river silts in the zone affected by an industrial city (formation, composition, geochemical peculiarities)]. Moscow: Institut mineralogii, geokhimii i kristalloghimii redkikh elementov [Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements] Publ., 2002, 100 p. (In Russian).
 8. Berezovskaya V.A. Makrofitobentos kak pokazatel' sostoyaniya sredy v pribrezhnykh vodakh Kamchatki : dis. ... dokt. geogr. nauk [Macrophytobenthos as an indicator of the state of the environment in the coastal waters of Kamchatka. Doctor's (Geography) Thesis]. Petropavlovsk-Kamchatskiy: Kamchatskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet [Kamchatka State Technical University] Publ., 2002, 364 p. (In Russian).
 9. Bessonova V.P., Ivanchenko O.E. Nakopleniye khroma v rasteniyakh i ego toksichnost' [Accumulation of chrome in the plants and his toxicity]. *Pytannya bioindykatsiy ta ekologiyi* [*Problems of Bioindications and Ecology*], 2011, issue 16-2, pp. 35–52. (In Russian).
 10. Khristoforova N.K. Bioindikatsiya i monitoring zagryazneniya morskikh vod tyazhelymi metallami [Bioindication and monitoring of marine pollution with heavy metals]. Leningrad: Nauka [Science], 1989, 192 p. (In Russian).
 11. Britske M.E. Atomno-absorbtsionnyy spektrokhimicheskii analiz (metody analiticheskoy khimii) [Atomic absorption spectrochemical analysis (methods of analytical chemistry)]. Moscow: Khimiya [Chemistry], 1982, 224 p. (In Russian).
 12. Voynar A.I. Biologicheskaya rol' mikroelementov v organizme zhivotnykh i cheloveka [Biological role of microelements in human and animal organism]. Moscow: Vysshaya shkola [Higher School], 1960, 240 p. (In Russian).
 13. Linnik P.N., Nabivanets B.I. Formy migratsii metallov v presnykh poverkhnostnykh vodakh [Forms of metals migration in fresh surface water]. Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House], 1986, 272 p. (In Russian).
 14. Vorobyev E.V., Usova E.V., Orekhova Yu.V. Analiz dinamiki i istochnikov postupleniya ionov margantsa, medi, nikelya i alyuminiya v transgranichnuyu reku Mius v period s 2003 po 2017 gody [Analysis of dynamics and sources of manganese, copper, nickel and aluminum ions found in the trans-border Mius River during the period from 2003 to 2017]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye* [*The South of Russia: Ecology, Development*], 2019, vol. 14, no. 1, pp. 81–93. doi: 10.18470/1992-1098-2019-1-81-93. (In Russian).
 15. Imantaev A.B., Chesnokova N.Yu. Soderzhanie tyazhelykh metallov v vysshikh vodnykh rasteniyakh Severnogo Kaspiya [Heavy metals content in higher aquatic plants of the Northern Caspian Sea]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [*Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*], 2022, no. 1, pp. 87–96. doi: 10.35567/19994508_2022_1_6. (In Russian).
 16. Imantaev A.B. Soderzhanie mikroelementov v *Zostera marina* (Linnaeus, 1753) v Severnom Kaspii v 2018–2020 gg. [Content of trace elements in *Zostera marina* (Linnaeus, 1753) in the Northern Caspian Sea in 2018–2020]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya* [*Aquatic Bioresources & Environment*], 2022, vol. 5, no. 3, pp. 24–31. doi: 10.47921/2619-1024_2022_5_3_24. (In Russian).
 17. Fomina A.A., Tikhomirova E.I., Korableva A.I. Analiz sodержaniya tyazhelykh metallov v vysshikh vodnykh rasteniyakh Volgogradskogo vodokhranilishcha v rayone aglomeratsii Saratov-Engel's [The analysis of heavy metals content in the higher aquatic plants of Volgograd Water Storage Basin around Saratov-Engels agglomeration]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [*Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*], 2016, vol. 18, no. 2 (3), pp. 822–827. (In Russian).
 18. Puchkov M.Yu., Zvolinskiy V.P., Novikov V.V., Kochetkova A.I., Loktionova E.G. Osobennosti nakopleniya tyazhelykh metallov vysshey vodnoy rastitel'nost'yu Volgogradskogo khranilishcha [The characteristics of heavy metals accumulation in higher aquatic plants of the Volgograd Reservoir]. *Fundamental'nye issledovaniya* [*Fundamental Research*], 2013, no. 6-2, pp. 392–396. (In Russian).

Поступила 22.08.2022

Принята к печати 28.07.2023