

УДК 550.47:581.526.3(476)

## СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВЫСШЕЙ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ВОДОЕМОВ И ВОДОТОКОВ БЕЛАРУСИ: ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВИДОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Н. В. ЖУКОВСКАЯ<sup>1)</sup>, Б. П. ВЛАСОВ<sup>1)</sup>, Н. В. КОВАЛЬЧИК<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Проанализированы пространственные и видовые особенности содержания микроэлементов (Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Zr, Mo, Pb) в высшей водной растительности водоемов и водотоков Беларуси по данным мониторинга. Растения, относящиеся к группе погруженных, характеризуются повышенной зольностью и накапливают большие количества Ti, Mn, Cu, Zn, Zr, Pb. Различия между экологическими группами растений водоемов и водотоков по содержанию в тканях Mn, Cu, Pb (элементы со встречаемостью 100 %) статистически значимы. Пространственный анализ показал, что на водоемы северной литогеохимической провинции приходится 71 % аномалий Mn и 80 % аномалий Cu, в том числе на Браславский район – 46 и 59 % аномалий Mn и Cu соответственно. Максимальные концентрации данных элементов характерны для погруженных макрофитов озер Снуды, Лосвидо, М. Белое, Белое (Лунинецкий район), Белое (Сурмино), Свитязь. Среди погруженных макрофитов озер аномальным накоплением Mn выделяются харовые водоросли (61 % случаев), уруть и роголистник, Cu – харовые водоросли, полушник и лобелия Дортмана, Pb – полушник, харовые водоросли и рдест. Макрофиты рек отличаются более высокими зольностью и средним содержанием Mn, Cu и Pb по сравнению с растениями водоемов. Участки с выявленными аномалиями Cu и Pb в тканях погруженных растений приурочены к центральной литогеохимической провинции Беларуси (на р. Свислочь приходится 67 и 33 % аномальных значений Cu и Pb соответственно). Аномальные значения Cu зафиксированы в тканях роголистника и рдестов, Pb – преимущественно рдестов. На основе кластерного анализа выделены виды растений в составе следующих родов: рдест, уруть, элодея, роголистник и ежеголовник, характеризующиеся повышенными содержаниями Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Zr, Pb и рекомендуемые в качестве индикаторов загрязнения водных объектов тяжелыми металлами.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы; высшая водная растительность; экологические группы; аномальные концентрации; пространственные закономерности; мониторинг.

### Образец цитирования:

Жуковская НВ, Власов БП, Ковальчик НВ. Содержание тяжелых металлов в высшей водной растительности водоемов и водотоков Беларуси: пространственные и видовые особенности. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2019;1:22–34.  
<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2019-1-22-34>

### For citation:

Zhukovskaya NV, Vlasov BP, Kavalchik NV. Heavy metals contents in higher aquatic plants of Belarusian reservoirs and rivers: spatial and species features. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2019;1:22–34. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2019-1-22-34>

### Авторы:

**Наталья Викторовна Жуковская** – кандидат географических наук; доцент кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики.  
**Борис Павлович Власов** – доктор географических наук, профессор; заведующий научно-исследовательской лабораторией озераведения факультета географии и геоинформатики.  
**Надежда Владимировна Ковальчик** – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики.

### Authors:

**Natalia V. Zhukovskaya**, PhD (geography); associate professor at the department of soil science and geographic information systems, faculty of geography and geoinformatics.  
[natazhuk@gmail.com](mailto:natazhuk@gmail.com)  
**Boris P. Vlasov**, doctor of science (geography), full professor; head of the laboratory of lakes research, faculty of geography and geoinformatics.  
[vlasov@bsu.by](mailto:vlasov@bsu.by)  
**Nadzeya V. Kavalchik**, PhD (geography), docent; associate professor at the department of soil science and geographic information systems, faculty of geography and geoinformatics.  
[kovalchiknv@gmail.com](mailto:kovalchiknv@gmail.com)

## HEAVY METALS CONTENTS IN HIGHER AQUATIC PLANTS OF BELARUSIAN RESERVOIRS AND RIVERS: SPATIAL AND SPECIES FEATURES

N. V. ZHUKOVSKAYA<sup>a</sup>, B. P. VLASOV<sup>a</sup>, N. V. KAVALCHYK<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: N. V. Zhukovskaya (natazhuk@gmail.com)

The spatial and species features of heavy metals (Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Zr, Mo, Pb) contents in higher aquatic plants of reservoirs and rivers within Belarus have been analyzed on monitoring data. The group of submerged plants are characterized by high ash content; and they accumulate large amounts of Ti, Mn, Cu, Zn, Zr, Pb. There are statistically significant differences between the plants in ecological groups of reservoirs and rivers in terms of Mn, Cu, Pb contents in the tissues (elements with a 100 % frequency). According to the spatial analysis the reservoirs of the northern geochemical province account for 71 % of the Mn anomalies and 80 % of the Cu anomalies, including the Braslav region – 46 % of the Mn anomalies and 59 % of Cu. Mn, Cu, Pb maximum concentrations are characteristics of submerged macrophytes such lakes as Snudy, Losvido, Maloye Beloye, Beloye (Luninets District), Beloe (Surmino), Svityaz. Among submerged macrophytes within lakes the abnormal accumulation of Mn has been noted for *Charophyta* (61 % of cases), *Myriophyllum* and *Ceratophyllum*, Cu – *Charophyta*, *Isoetes* and *Lobelia dortmanna*, Pb – *Isoetes*, *Charophyta* and *Potamogeton*. The macrophytes within rivers are characterized by the higher ash content and the average content of Mn, Cu and Pb in comparison with the lakes plants. Areas with identified Cu and Pb anomalies in the submerged plants are confined to the central geochemical province of Belarus (the Svisloch river accounts for 67 % of anomalous values of Cu and 33 % of Pb). Anomalous values of Cu have been fixed in the tissues of the *Ceratophyllum* and *Potamogeton*, Pb – mostly in *Potamogeton*. The cluster analysis has distinguished a group of plant species as a part of the following genera: *Potamogeton*, *Myriophyllum*, *Elodea*, *Ceratophyllum* and *Sparganium*. The group is characterized by elevated contents of Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Zr, Pb and recommended as indicators of polluting water objects with heavy metals.

**Keywords:** heavy metals; higher aquatic flora; ecological groups; outliers; spatial patterns; monitoring.

### Введение

Высшая водная растительность является хорошим индикатором состояния водных экосистем благодаря способности накапливать химические элементы, что обуславливает ее использование в системе мониторинга и контроля состояния водных экосистем Беларуси.

Во многих работах, посвященных индикаторной роли высшей водной растительности, особое внимание уделяется поглощению макрофитами тяжелых металлов (ТМ), обладающих высокой биохимической активностью. Разнообразие условий произрастания и видового состава водных растений Беларуси [1] обуславливают различия в содержании металлов в тканях растений.

Цель работы – анализ пространственных и видовых особенностей накопления отдельных химических элементов (Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Zr, Mo, Pb) водной растительностью рек и озер Беларуси.

### Методика исследования

Изучение аккумуляции ТМ высшей водной растительностью проводилось с 2000 по 2015 г. Объектами исследований служили растения разных экологических групп: надводные (аир обыкновенный или болотный *Acorus calamus* L., белокрыльник болотный *Calla palustris* L., тростник обыкновенный *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., осоки вздутая *Carex rostrata* Stokes, волосистоплодная *Carex lasiocarpa* Ehrh. и острая *Carex acuta* L., ежеголовник прямостоячий *Sparganium erectum* L. и плавающий *Sparganium natans* L., манник большой *Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb. и плавающий *Glyceria fluitans* (L.) R. Br., меч-трава обыкновенная *Cladium mariscus* (L.) Pohl, камыш озерный *Schoenoplectus lacustris* (L.), камышевик лесной *Scirpus sylvaticus* L., рогоз узколистный *Typha angustifolia* L. и широколистный *Typha latifolia* L., ситняг игольчатый *Eleocharis acicularis* (L.) Roem. et Schult. и болотный *Eleocharis palustris* (L.) Roem. et Schult., стрелолист стрелолистный *Sagittaria sagittifolia* L., сусак зонтичный *Butomus umbellatus* L., хвощ речной *Equisetum fluviatile* L., цицания болотная *Zizania palustris* L. и широколистная *Zizania latifolia* (Griseb.) Stapf, частуха подорожниковая *Alisma plantago-aquatica* L.); погруженные (гидрилла муточатая *Hydrilla verticillata* (L. fil.) Royle, ежеголовник всплывающий *Sparganium emersum* Rehm., рдесты блестящий *Potamogeton lucens* L., пронзеннолистный *Potamogeton perfoliatus* L., волосовидный *Potamogeton trichoides* Cham. et Schlecht., длиннейший *Potamogeton praelongus* Wulf., курчавый *Potamogeton crispus* L., остролистный *Potamogeton acutifolius* Link,

сжатый *Potamogeton compressus* L., туполистный *Potamogeton obtusifolius* Mert. et Koch, узловатый *Potamogeton nodosus* Poir., фриза *Potamogeton friesii* Rupr., уруть колосистая *Myriophyllum spicatum* L. и мутовчатая *Myriophyllum verticillatum* L., элодея канадская *Elodea canadensis* Michx., роголистник подводный *Ceratophyllum submersum* L., роголистник темно-зеленый *Ceratophyllum demersum* L., телорез алоэвидный *Stratiotes albidus* L., полушник озерный *Isoetes lacustris* L., прибрежница одноцветковая *Littorella uniflora* (L.) Aschers); полупогруженные с плавающими листьями (горец земноводный *Persicaria amphibian* (L.), кубышка желтая *Nuphar lutea* (L.) Smith., кувшинка чисто-белая *Nymphaea candida* J. et C. Presl., рдест плавающий *Potamogeton natans* L.). Рассматриваются также харовые водоросли (*Charophyta*), которые часто относят к высшей водной растительности.

Выбор растений определялся их распространенностью и численностью (высокой) в пределах исследуемых водных объектов. Пробы растений отбирались на 97 ключевых участках (КУ), расположенных на озерах (46 КУ), водохранилищах (4) и реках (47) Беларуси (рис. 1). Общий объем выборки по макрофитам составил 1053.

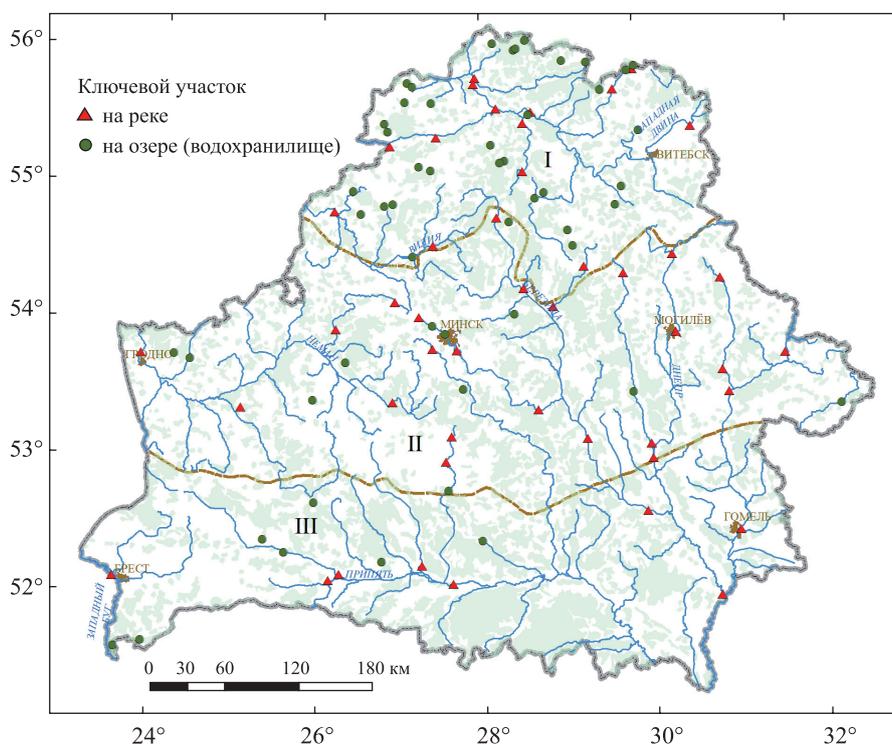


Рис. 1. Схема расположения ключевых участков сети мониторинга водной растительности на территории Республики Беларусь.

Литогеохимические провинции: I – Северная; II – Центральная; III – Южная

Fig. 1. Key sites location of aquatic plants monitoring network within the territory of Belarus.  
 Litho-geochemical provinces: I – North; II – Central; III – South

Анализ валового содержания элементов выполнялся эмиссионным спектральным методом по методике [2]. Нижний предел обнаружения составляет (мг/кг на золу): Ti – 1, V – 10, Cr – 5, Mn – 10, Ni – 8, Cu – 1, Zn – 100, Zr – 10, Mo – 3, Pb – 5. Содержание элементов пересчитывалось на абсолютно сухое вещество.

Статистическая обработка данных включала: оценку распределения переменных с помощью гистограмм, вероятностных графиков и критериев согласия (Колмогорова – Смирнова, Шапиро – Уилка); вычисление описательных статистик; непараметрический дисперсионный анализ Краскела – Уоллиса.

В случае усеченных выборок при доле проб с содержанием определяемого элемента выше предела обнаружения более 50 % в качестве среднего использовалась медиана, при доле менее 50 % среднее значение рассчитывалось по формуле [3]

$$\bar{x} = \frac{(\bar{x}_{\max} - \bar{x}_{\min})n}{N} + \bar{x}_{\min}, \quad (1)$$

где  $\bar{x}_{\max}$  – максимально возможное среднее (при исключении из расчетов проб с концентрациями ниже предела обнаружения);  $\bar{x}_{\min}$  – минимально возможное среднее (при обнулении проб с концентрациями ниже предела обнаружения);  $n$  – число «непустых» проб;  $N$  – число всех проб.

## Результаты исследования и их обсуждение

Параметры содержания изученных элементов (Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Zr, Mo, Pb) по экологическим группам растений представлены в табл. 1 и 2. Отдельно рассматривалась высшая водная растительность водоемов и водотоков. Растительность последних формируется под воздействием такого мощного экологического фактора, определяющего их специфику, как течение.

Таблица 1

Содержание металлов в макрофитах  
различных экологических групп водоемов ( $n = 769$ ), мг/кг

Table 1

Metals contents in macrophytes  
of various ecological groups within reservoirs ( $n = 769$ ), mg/kg

Элемент	Встречаемость элемента, %	Погруженные ( $n = 314$ )	С плавающими листьями ( $n = 132$ )	Надводные ( $n = 323$ )
Ti	51–67	14,7 (н. о. – 1397)	1,38 (н. о. – 305)	1,16 (н. о. – 1397)
V	30–39	6,44 (н. о. – 233)	2,11 (н. о. – 19,0)	2,82 (н. о. – 233)
Cr	23–42	4,54 (н. о. – 94,2)	0,60 (н. о. – 7,32)	0,99 (н. о. – 62,8)
Mn	100	301 (0,60–9158)	93,6 (0,23–3957)	23,6 (0,03–3259)
Ni	23–40	1,26 (н. о. – 23,6)	0,098 (н. о. – 0,87)	0,38 (н. о. – 23,3)
Cu	100	2,34 (0,07–235,6)	0,32 (0,07–12,2)	1,40 (0,08–76,1)
Zn	10–39	32,4 (н. о. – 1948)	2,49 (н. о. – 39,6)	12,2 (н. о. – 134)
Zr	41–44	33,1 (н. о. – 1299)	9,07 (н. о. – 91,9)	13,6 (н. о. – 931)
Mo	36–76	0,18 (н. о. – 56,2)	0,155 (н. о. – 3,87)	0,22 (н. о. – 13,4)
Pb	100	3,19 (0,08–471,2)	0,43 (0,04–21,4)	0,46 (0,05–93,9)

Примечание. В скобках указаны пределы вариации; н. о. – ниже предела чувствительности метода.

В ряде исследований отмечается, что погруженная растительность накапливает большие количества микроэлементов по сравнению с полупогруженными и растениями с плавающими листьями [4; 5]. Водные растения извлекают тяжелые металлы из воды и донных отложений. Низшие растения, которые не имеют корней и проводящей сосудистой системы, поглощают ионы металлов всем телом и поэтому являются более уязвимыми для токсикантов [6]. Аналогичный механизм имеет место и для полностью погруженных высших растений, что делает их более чувствительными индикаторами загрязнения. Полученные нами результаты также показали, что группа погруженных растений водоемов накапливает большие количества Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Zr, Pb. Различия между экологическими группами по содержанию Mn, Cu, Pb (элементы с 100 % встречаемостью) в тканях водных растений статистически значимы (*Kruskal – Wallis test*,  $H = 144–219$ ;  $df = 2$ ;  $p < 0,001$ ). Следует отметить, что зольность в группе погруженных растений составляет 19,5 % и значительно превышает величину данного показателя для растений с плавающими листьями (9,6 %) и водно-воздушных (7,3 %).

Последовательность среднемноголетних содержаний элементов по экологическим группам озерных растений выглядит следующим образом:

погруженные	Mn > Zn > Zr > Ti > V > Cr > Pb > Cu > Ni > Mo
с плавающими листьями	Mn > Zr > Zn > V > Ti > Cr > Pb > Cu > Mo > Ni
надводные	Mn > Zr > Zn > V > Cu > Ti > Cr > Pb > Ni > Mo

В целом ряды накопления для рассматриваемых экологических групп схожи. Исключение составляет Cu, которая группой воздушно-водных растений накапливается больше, чем Ti, Cr и Pb.

Анализируя содержание химических элементов в отдельных формациях макрофитов рек, следует отметить, что погруженная растительность отличается повышенным средним содержанием Ti, Mn, Cu, Zn, Zr, Mo, Pb. Различия по содержанию Mn, Cu, Pb между экологическими группами статистически значимы (*Kruskal – Wallis test*,  $H = 32,7–35,6$ ;  $df = 2$ ;  $p < 0,001$ ). Зольность для группы погруженных растений составляет 24,6 %, воздушно-водных – 14,6, растений с плавающими листьями – 17,8 %, что превышает соответствующие показатели для водных растений водоемов.

Таблица 2

Содержание металлов в макрофитах  
 различных экологических групп рек ( $n = 281$ ), мг/кг

Table 2

Metals contents in macrophytes  
 of various ecological groups within rivers ( $n = 281$ ), mg/kg

Элемент	Встречаемость элемента, %	Погруженные ( $n = 82$ )	С плавающими листьями ( $n = 39$ )	Надводные ( $n = 160$ )
Ti	69–89	18,7 (н. о. – 436)	4,55 (н. о. – 270)	2,74 (н. о. – 737)
V	30–55	1,33 (н. о. – 48,3)	1,23 (н. о. – 12,1)	3,83 (н. о. – 34,4)
Cr	41–67	2,60 (н. о. – 127,5)	3,05 (н. о. – 27,0)	2,76 (н. о. – 34,4)
Mn	100	571 (1,0–3796)	382 (20–3036)	69,2 (0,05–10 000)
Ni	33–59	0,26 (н. о. – 2,03)	0,38 (н. о. – 3,85)	0,38 (н. о. – 5,74)
Cu	100	4,91 (0,10 – 81,6)	0,71 (0,09–17,5)	2,31 (0,07–96,4)
Zn	18–36	13,4 (н. о. – 169,5)	6,74 (н. о. – 54,5)	12,6 (н. о. – 117)
Zr	61–66	5,15 (н. о. – 144,8)	4,31 (н. о. – 108,9)	2,18 (н. о. – 246)
Mo	59–89	0,35 (н. о. – 2,0)	0,13 (н. о. – 0,81)	0,16 (н. о. – 2,84)
Pb	100	2,37 (0,05–36,3)	0,43 (0,10–11,6)	0,41 (0,05–23,2)

Примечание. В скобках указаны пределы вариации; н. о. – ниже предела чувствительности метода.

Последовательность среднесуточных содержаний элементов по формациям речных растений выглядит следующим образом:

погруженные  $Mn > Ti > Zn > Zr > Cu > Cr > Pb > V > Mo > Ni$   
 с плавающими листьями  $Mn > Zn > Ti > Zr > Cr > V > Cu > Pb > Ni > Mo$   
 надводные  $Mn > Zn > V > Cr > Ti > Cu > Zr > Pb > Ni > Mo$

Для надводных уменьшается роль Ti и увеличивается роль V.

Сравнение элементного состава погруженной растительности водоемов и водотоков показало, что последняя отличается более высокими зольностью и средним содержанием Ti, Mn и Cu (рис. 2). Однако максимальные значения указанных металлов зафиксированы в растениях водоемов (т. е. больший диапазон).

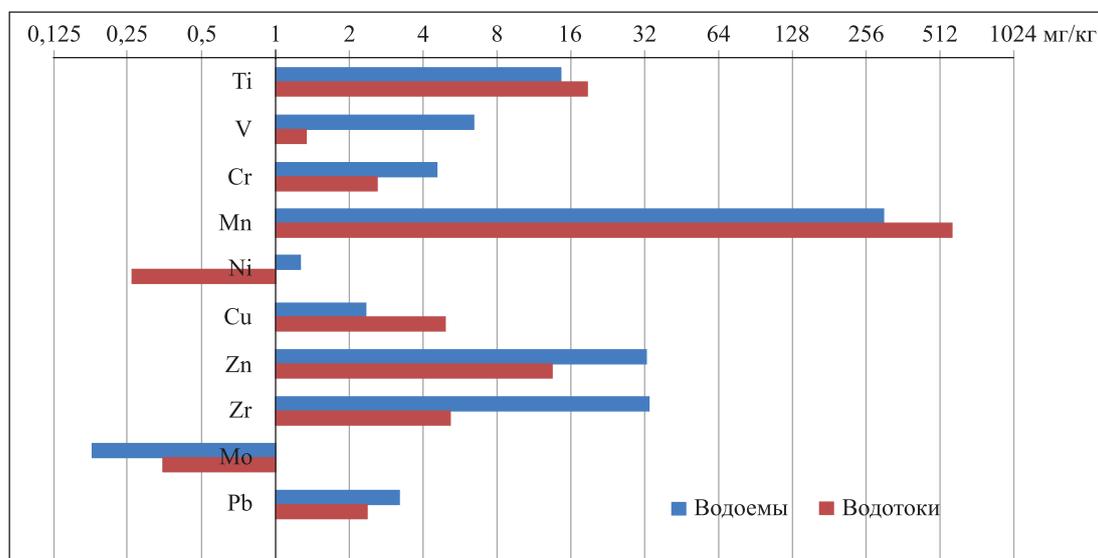


Рис. 2. Среднее содержание химических элементов в погруженных растениях водоемов и водотоков

Fig. 2. Average contents of chemical elements in submerged plants of reservoirs and rivers

Для надводных и растений с плавающими листьями рек также отмечаются бóльшие зольность и среднее содержание Ti, Cr, Mn, Cu по сравнению с аналогичными экологическими группами растений водоемов (рис. 3).

Выявление участков (проб) с аномальным содержанием химических элементов является одной из важнейших задач, возникающих при обработке геохимических данных. При этом предполагается, что аномальное содержание того или иного химического элемента (чаще – группы элементов) вызвано проявлением некоторого локального процесса, в котором один (или несколько взаимосвязанных) из большого числа факторов, обычно контролирующих распределение элементов и определяющих вероятностную природу геохимического поля, оказался довлеющим [7].

Традиционно выявление участков с аномальным содержанием элементов проводится известными статистическими методами [8; 9]. В настоящем исследовании для идентификации аномальных значений был использован относящийся к робастным метод *box-plot* («ящик с усами»). По результатам исследований [10] данный способ является наиболее эффективным при определении аномальных величин в случае, если их число не превышает 10 %. График *box-plot* показывает медиану, нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значения выборки и выбросы (рис. 4). Выбросами считаются значения, превышающие 1,5 межквартильного размаха.

Пространственный анализ аномальных значений исследуемых элементов в погруженных макрофитах показал, что на Северную литогеохимическую провинцию приходится 71 % аномалий Mn и 80 % аномалий Cu, в том числе на Браславский район – 46 % аномалий Mn и 59 % Cu (рис. 5).

Территория Браславского района входит в состав Северной литогеохимической провинции Беларуси, рельеф которой характеризуется широким распространением плоских заболоченных озерно-ледниковых низин и равнин, краевого ледникового рельефа, обилием озер и бессточных котловин [11]. Для пород характерны относительно слабая преобразованность в результате выветривания и эрозии и интенсивное современное озерное осадконакопление. Провинция, по сравнению со среднебелорусским фоном, выделяется повышенными содержаниями в отложениях Ti, Mn, Cr, V, Ni, а также Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO и пониженным содержанием SiO<sub>2</sub> [12]. Браславский педогеохимический подрайон Браславо-Глубокско-Городокского района [13] отличается повышенными концентрациями в почвах Mn и Ni, пониженными – V, Cu, Zr, на уровне среднего по Беларуси содержанием Ti.

В донных отложениях озер Браславского района (озера Снуды, Дривяты) выявлены аномальные содержания Mn [14].

Установлены озера, для погруженных макрофитов которых в наибольшей степени характерны проявления аномальных концентраций анализируемых микроэлементов (см. рис. 4). Так, оз. Снуды выделяется аномальными содержаниями Mn, Cu и Pb в погруженных макрофитах. Максимальные зафиксированные концентрации Mn превышают средние значения в 30 раз, Cu – в 27 раз, Pb – в 14 раз.

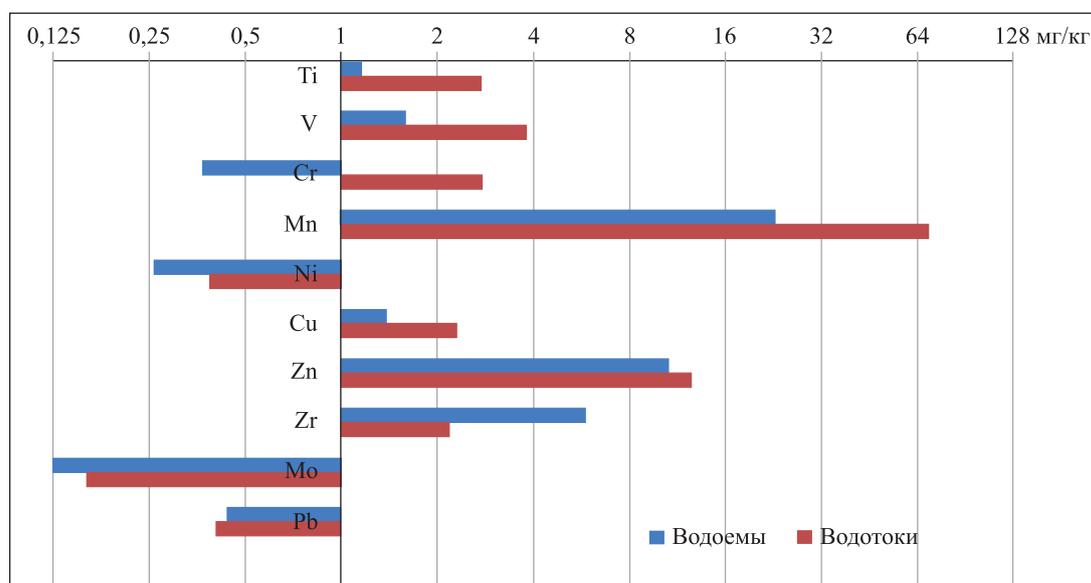


Рис. 3. Среднее содержание химических элементов в надводных растениях водоемов и водотоков

Fig. 3. Average contents of chemical elements in emergent plants of reservoirs and rivers



Также аномальными содержаниями всех трех анализируемых элементов в погруженных макрофитах выделяются оз. Лосвидо: коэффициент концентрации<sup>1</sup> Mn равен 17,2, Cu – 21,4, Pb – 11,3; оз. М. Белое: Mn – 15,6, Cu – 27,6, Pb – 20,4; оз. Белое (Лунинецкий район): Mn – 10,1, Cu – 24,9, Pb – 19,2; оз. Белое (Сурмино): Mn – 16,3, Cu – 9,5, Pb – 8,3.

На оз. Свитязь приходится 16 % образцов с аномальным содержанием Pb, максимальная концентрация которого в погруженных макрофитах составляет 471 мг/кг. К оз. Белое (Лунинецкий район) приурочено 12,5 % выявленных аномальных значений Pb.

Анализ видовой структуры погруженных макрофитов показал, что аномалии Mn отмечаются главным образом у харовых водорослей (61 %), в меньшей степени – у урути и роголистника (рис. 6). Аномальными концентрациями Cu выделяются харовые водоросли, полушник и лобелия Дортмана, Pb – полушник, харовые водоросли и рдест. Следует отметить, что полушник озерный отличается максимальным

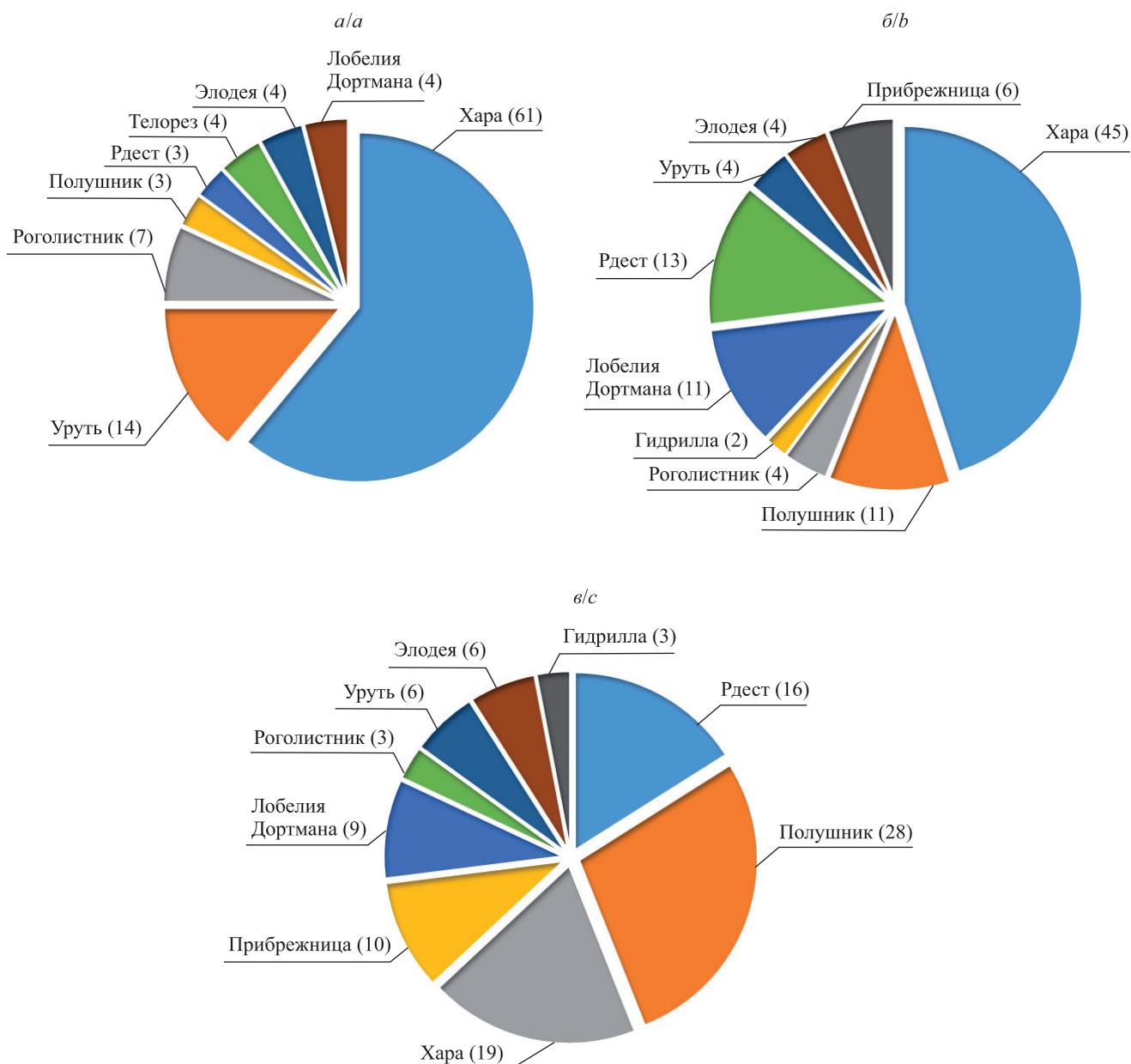


Рис. 6. Видовой состав (%) погруженных макрофитов озер с выявленными аномальными концентрациями Mn (а), Cu (б), Pb (в)

Fig. 6. Species composition of submerged macrophytes with anomalous concentrations of Mn (a), Cu (b), Pb (c) within lakes

<sup>1</sup> Коэффициент концентрации рассчитывался как отношение содержания элемента в объекте к среднему содержанию элемента в погруженных макрофитах озер Беларуси в целом.

средним значением (28 мг/кг) и размахом (4,64–35,3 мг/кг) содержания Pb по сравнению с другими видами погруженных высших водных растений. Кроме Pb, для полушника получены наибольшие параметры накопления Ti, Cu и Zn (табл. 3). Согласно [15] наличие в водоемах полушника озерного (*Isoetes lacustris*) указывает на чистоту и олиготрофность водоемов.

Пространственные особенности распределения аномальных содержаний в погруженных макрофитах рек представлены на рис. 7. Аномальных значений содержания Mn в группе погруженных растений не установлено. Большая часть КУ с выявленными аномалиями Cu и Pb приурочена к Центральной литогеохимической провинции Беларуси. Половина КУ расположена в пределах водосбора р. Березины. На КУ, находящихся на р. Свислочи (Вязье, Королищевичи, Анусино), приходится 67 % аномальных значений Cu и 33 % Pb (рис. 8).

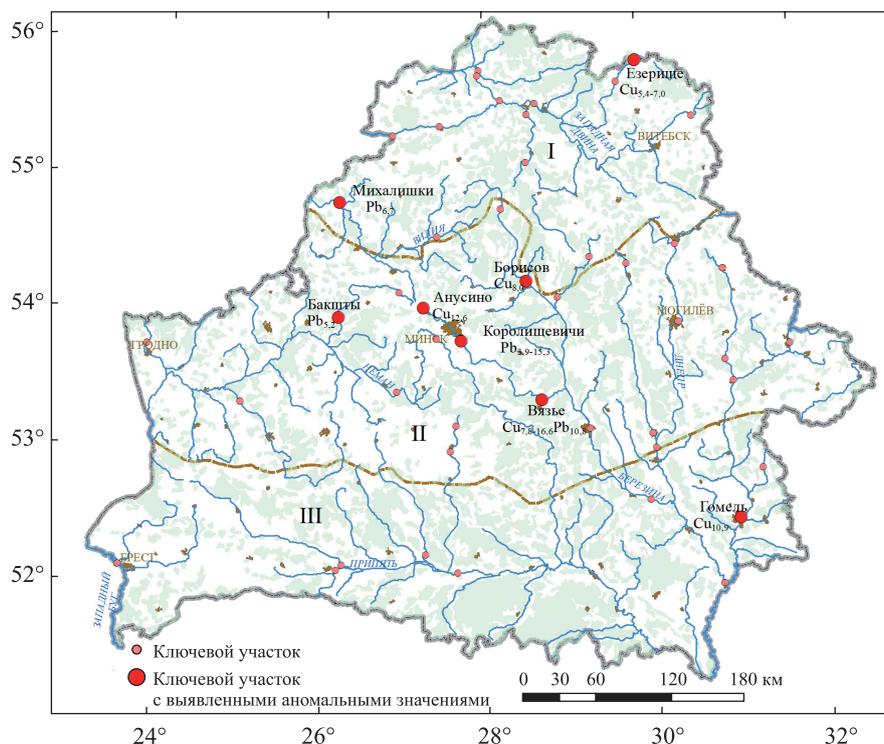


Рис. 7. Аномальные содержания Cu и Pb в погруженных макрофитах рек. Литогеохимические провинции покровных отложений: I – Северная; II – Центральная; III – Южная

Fig. 7. Anomalous contents of Cu and Pb in submerged plants of rivers. Lithochemochemical provinces: I – North; II – Central; III – South

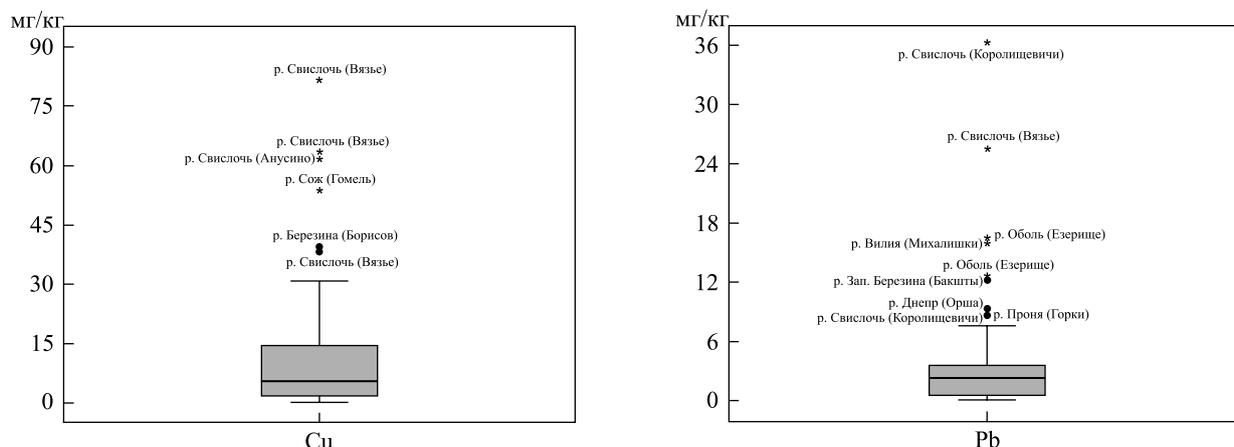


Рис. 8. Диаграммы размаха Cu, Pb в погруженных макрофитах рек Беларуси  
 Fig. 8. Box-plot of Cu and Pb distributions in submerged plants of Belarusian rivers

## Параметры содержания тяжелых металлов в высшей водной растительности водоемов и водотоков Беларуси, мг/кг сухого вещества

Table 3

## Parameters of heavy metals contents in higher aquatic plants of Belarusian reservoirs and rivers, mg/kg DW

Растение, <i>n</i>	Ti	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Zr	Pb
Хара, 48	$\frac{26,3}{\text{н. о.} - 622}$	$\frac{6,0}{\text{н. о.} - 43,5}$	$\frac{3,3}{\text{н. о.} - 20,4}$	$\frac{1373}{94,4-9158}$	$\frac{2,4}{\text{н. о.} - 14,0}$	$\frac{8,9}{0,38-186}$	$\frac{22,7}{\text{н. о.} - 281}$	$\frac{36,9}{\text{н. о.} - 219}$	$\frac{6,3}{0,02-84,3}$
Рдест, 176	$\frac{3,5}{\text{н. о.} - 973}$	$\frac{3,1}{\text{н. о.} - 24,5}$	$\frac{4,3}{\text{н. о.} - 128}$	$\frac{184}{0,60-3796}$	$\frac{0,95}{\text{н. о.} - 14,0}$	$\frac{1,8}{0,07-63}$	$\frac{0,95}{\text{н. о.} - 169}$	$\frac{12,6}{\text{н. о.} - 120}$	$\frac{1,5}{0,08-36}$
Роголистник, 30	$\frac{2,6}{\text{н. о.} - 294}$	$\frac{1,6}{\text{н. о.} - 48,3}$	$\frac{1,6}{\text{н. о.} - 54,4}$	$\frac{789}{60,2-4237}$	$\frac{2,0}{\text{н. о.} - 13,4}$	$\frac{4,2}{0,31-96,8}$	$\frac{10,4}{\text{н. о.} - 58,8}$	$\frac{3,3}{\text{н. о.} - 145}$	$\frac{3,6}{0,64-22,6}$
Уруть, 24	$\frac{4,4}{\text{н. о.} - 563}$	$\frac{5,5}{\text{н. о.} - 21,5}$	$\frac{4,7}{\text{н. о.} - 21,5}$	$\frac{260}{26,3-6251}$	$\frac{0,16}{\text{н. о.} - 7,2}$	$\frac{3,0}{0,48-50,3}$	$\frac{16,3}{\text{н. о.} - 75,0}$	$\frac{3,8}{\text{н. о.} - 625}$	$\frac{4,4}{0,48-35,9}$
Элодея, 40	$\frac{7,3}{\text{н. о.} - 436}$	$\frac{4,2}{\text{н. о.} - 22,7}$	$\frac{2,4}{\text{н. о.} - 42,3}$	$\frac{411}{11,7-3169}$	$\frac{0,18}{\text{н. о.} - 9,03}$	$\frac{3,0}{0,26-30,1}$	$\frac{6,7}{\text{н. о.} - 39,6}$	$\frac{13,4}{\text{н. о.} - 87,1}$	$\frac{5,2}{0,08-35,7}$
Телорез, 26	$\frac{1,9}{\text{н. о.} - 82,4}$	$\frac{2,3}{\text{н. о.} - 8,3}$	$\frac{0,90}{\text{н. о.} - 3,2}$	$\frac{1007}{4,40-3175}$	$\frac{0,12}{\text{н. о.} - 0,64}$	$\frac{0,41}{0,04-2,3}$	$\frac{4,0}{\text{н. о.} - 31,8}$	$\frac{16,9}{\text{н. о.} - 82,4}$	$\frac{0,54}{0,15-9,6}$
Полушник озерный, 13	$\frac{59,3}{\text{н. о.} - 942}$	$\frac{2,7}{\text{н. о.} - 142}$	$\frac{2,9}{\text{н. о.} - 94,2}$	$\frac{313}{59,7-4545}$	$\frac{0,40}{\text{н. о.} - 23,6}$	$\frac{13,9}{7,7-236}$	$\frac{39,8}{\text{н. о.} - 19,47}$	$\frac{6,0}{\text{н. о.} - 1299}$	$\frac{35,2}{4,6-471}$
Кубышка, 102	$\frac{1,0}{\text{н. о.} - 305}$	$\frac{2,2}{\text{н. о.} - 12,1}$	$\frac{1,2}{\text{н. о.} - 27,0}$	$\frac{121}{3,1-3036}$	$\frac{0,18}{\text{н. о.} - 3,9}$	$\frac{0,32}{0,07-17,5}$	$\frac{3,0}{\text{н. о.} - 54,5}$	$\frac{11,6}{\text{н. о.} - 109}$	$\frac{0,19}{0,06-18,3}$
Кувшинка, 22	$\frac{6,1}{\text{н. о.} - 39,7}$	$\frac{1,2}{\text{н. о.} - 10,3}$	$\frac{0,23}{\text{н. о.} - 1,7}$	$\frac{71,4}{0,23-3184}$	$\frac{0,11}{\text{н. о.} - 0,87}$	$\frac{0,29}{0,10-4,3}$	$\frac{2,1}{\text{н. о.} - 16,5}$	$\frac{7,9}{\text{н. о.} - 30,9}$	$\frac{0,13}{0,09-1,9}$
Тростник, 130	$\frac{0,05}{\text{н. о.} - 36,4}$	$\frac{2,1}{\text{н. о.} - 18,0}$	$\frac{0,35}{\text{н. о.} - 3,2}$	$\frac{11,8}{0,06-10000}$	$\frac{0,09}{\text{н. о.} - 0,72}$	$\frac{2,0}{0,11-15,2}$	$\frac{6,0}{\text{н. о.} - 134}$	$\frac{6,9}{\text{н. о.} - 54,9}$	$\frac{0,49}{0,05-13,5}$
Камыш, 60	$\frac{0,43}{\text{н. о.} - 32,5}$	$\frac{1,3}{\text{н. о.} - 8,3}$	$\frac{0,27}{\text{н. о.} - 3,2}$	$\frac{20,9}{0,07-758}$	$\frac{0,11}{\text{н. о.} - 1,5}$	$\frac{1,2}{0,05-96,4}$	$\frac{8,5}{\text{н. о.} - 73,4}$	$\frac{1,2}{\text{н. о.} - 30,4}$	$\frac{0,37}{0,01-2,8}$
Осока, 37	$\frac{3,1}{\text{н. о.} - 22,0}$	$\frac{0,64}{\text{н. о.} - 4,9}$	$\frac{0,82}{\text{н. о.} - 7,9}$	$\frac{13,9}{0,01-2099}$	$\frac{0,12}{\text{н. о.} - 1,6}$	$\frac{1,3}{0,16-15,7}$	$\frac{9,1}{\text{н. о.} - 56,1}$	$\frac{3,5}{\text{н. о.} - 28,8}$	$\frac{0,52}{0,05-6,5}$
Ежеголовник, 31	$\frac{6,0}{\text{н. о.} - 737}$	$\frac{4,5}{\text{н. о.} - 34,4}$	$\frac{4,6}{\text{н. о.} - 34,4}$	$\frac{133}{4,94-4064}$	$\frac{0,49}{\text{н. о.} - 4,9}$	$\frac{1,8}{0,12-24,6}$	$\frac{8,1}{\text{н. о.} - 49,1}$	$\frac{21,2}{\text{н. о.} - 246}$	$\frac{0,64}{0,09-14,7}$
Манник, 32	$\frac{0,63}{\text{н. о.} - 187}$	$\frac{3,5}{\text{н. о.} - 31,1}$	$\frac{1,8}{\text{н. о.} - 9,3}$	$\frac{6,4}{0,01-996}$	$\frac{0,19}{\text{н. о.} - 1,2}$	$\frac{1,4}{0,25-8,0}$	$\frac{6,7}{\text{н. о.} - 31,1}$	$\frac{8,3}{\text{н. о.} - 93,4}$	$\frac{0,46}{0,07-4,7}$

Примечание. В числителе указано среднее значение, в знаменателе – наименьшее и наибольшее значения; н. о. – ниже предела чувствительности метода.

Среди видов растений аномальные значения Cu зафиксированы у роголистника и рдестов, Pb – преимущественно у рдестов (рис. 9).

Концентрация исследуемых элементов в значительной степени зависит от видовой принадлежности растения (см. табл. 3). Повышенной способностью накапливать Mn обладают роголистник и телорез, Cu – роголистник, уруть и элодея, Pb – элодея, уруть и роголистник. В целом максимальными средними содержаниями большинства изученных микроэлементов (Ti, V, Mn, Ni, Cu, Zr) характеризуются харовые водоросли. Среди всех изученных видов водных растений минимальными средними концентрациями Mn отличаются манник, тростник и осока, Cu – телорез, кувшинка и кубышка, Pb – кувшинка, кубышка, камыш.

Значительное варьирование концентраций металла в тканях растений одного вида может свидетельствовать о безбарьерном типе накопления. Наибольший размах варьирования V отмечается для роголистника, харовых водорослей, ежеголовника; Cr – рдеста, роголистника; Mn – тростника, харовых водорослей, урути; Ni – рдеста, харовых водорослей, роголистника; Cu – харовых водорослей, камыша, роголистника; Zn – харовых водорослей, рдеста; Pb – харовых водорослей.

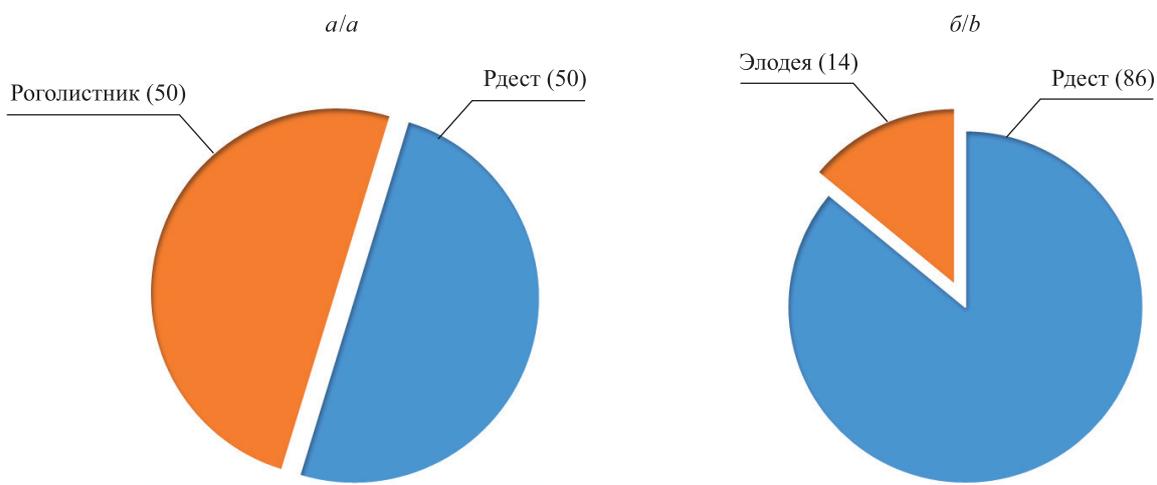


Рис. 9. Видовой состав (%) погруженных макрофитов рек с выявленными аномальными концентрациями Cu (а) и Pb (б)

Fig. 9. Species composition of submerged macrophytes with anomalous concentrations of Cu (a) and Pb (b) within rivers

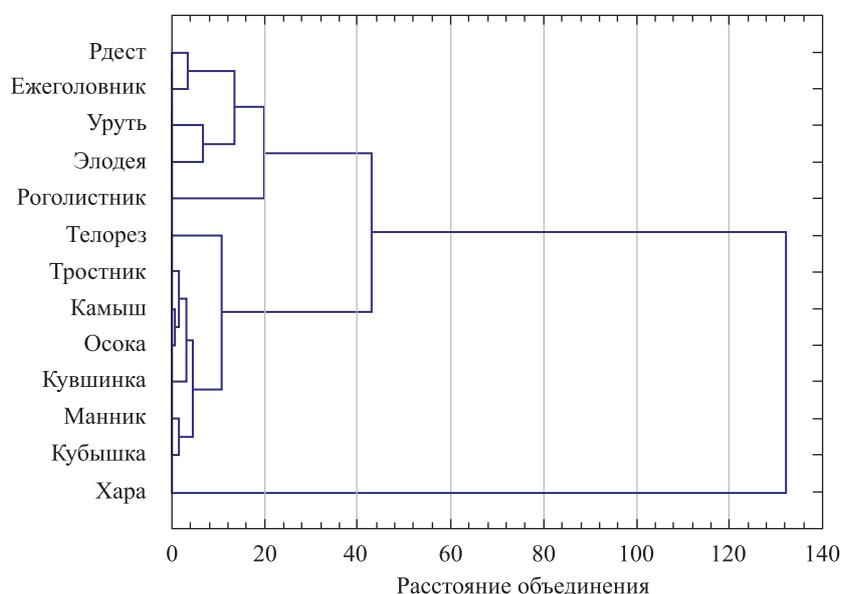


Рис. 10. Дендрограмма классификации макрофитов (метод Уорда, дистанция Евклида, стандартизированные данные)

Fig. 10. Macrophytes classification dendrogram (Ward's method, Euclidean distance, standardized data)

В ряде исследований для проведения мониторинга водных объектов предлагается использовать виды рдеста [5; 16], уруть колосистую [16] и мутовчатую [4], роголистник [4; 17].

Для группировки исследуемых растений по совокупности средних величин содержания Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Zr и Pb был использован иерархический кластерный анализ, по результатам которого выделено три кластера (рис. 10). К первому относится группа растений, объединяющая полностью погруженные гидрофиты (рдест, уруть, элодея, роголистник) и ежеголовник. Последний представлен двумя видами – ежеголовником всплывающим и ежеголовником прямым, относящимися к полностью погруженным и воздушно-водным гидрофитам соответственно. Растения данной группы характеризуются повышенными содержаниями исследуемых элементов (рис. 11). Второй кластер включает харовые водоросли, характеризующиеся максимальными средними содержаниями элементов (за исключением Cr). В третью группу входят воздушно-водные гидрофиты и гидрофиты (тростник, камыш, осока, манник), гидрофиты с плавающими листьями (кувшинка, кубышка) и телорез алоэвидный, относящийся к полностью погруженным гидрофитам. Растения группы отличаются пониженными средними значениями концентраций металлов. Несколько обособленное положение в рамках данной группы занимает телорез из-за повышенного среднего содержания Mn и Zr.

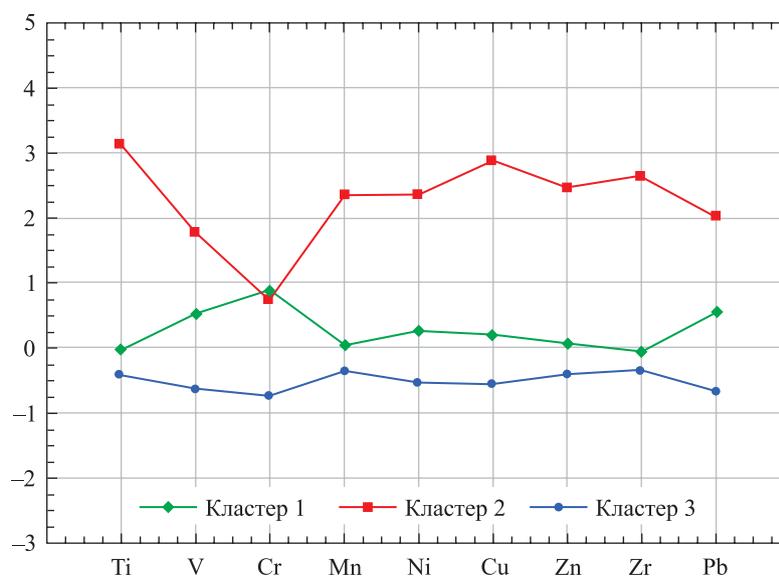


Рис. 11. График средних для каждого кластера макрофитов

Fig. 11. Graph of averages for each macrophyte cluster

## Выводы

Анализ накопления тяжелых металлов водными растениями различных экологических групп показал, что погруженные растения водоемов выделяются повышенным содержанием Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Zr, Pb. Различия между формациями по накоплению Mn, Cu, Pb в тканях водных растений статистически значимы.

Сравнение элементного состава погруженной растительности водоемов и водотоков показало, что первая отличается более низкими зольностью и средним содержанием Ti, Mn и Cu при значительно большем диапазоне варьирования показателей.

Пространственный анализ аномальных значений Mn, Cu и Pb в погруженных макрофитах озер выявил, что около 50 % аномалий Mn и Cu приходится на озера Браславского района (озера Снуды, Обстерно, Дривяты, Волосо Ю., Богинское, Ричу). Озера Свитязь и Белое (Лунинецкий район) выделяются числом проб с аномальным содержанием Pb в погруженных макрофитах.

На основе кластерного анализа выделена группа растений в составе видов следующих родов: рдест, уруть, элодея, роголистник и ежеголовник, характеризующихся повышенными содержаниями Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Zr, Pb и рекомендуемых в качестве индикаторов загрязнения тяжелыми металлами.

## Библиографические ссылки

1. Гигевич ГС, Власов БП, Вынаев ГВ. Высшие водные растения Беларуси: эколого-биологическая характеристика, использование и охрана. Минск: Издательский центр БГУ; 2001.
2. Зырин НГ, Обухов АИ. Спектральный анализ почв, растений и других биологических материалов. Минск: МГУ; 1977.

3. Шиманович ВМ, Акудович СА. К методике расчета средних значений микроэлементов для выборок, усеченных нижним пределом обнаружения. *Литасфера*. 2000;13:144–147.
4. Шашуловская ЕА. О накоплении тяжелых металлов в высшей водной растительности Волгоградского водохранилища. *Поволжский экологический журнал*. 2009;4:357–360.
5. Гришанцева ЕС, Сафронова НС, Кирпичникова НВ, Федорова НП. Распределение микроэлементов в высшей водной растительности Иваньковского водохранилища. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2010;3:223–231.
6. Микрякова ТФ. Накопление тяжелых металлов макрофитами в условиях различного уровня загрязнения водной среды. *Водные ресурсы*. 2002;29(2):253–255.
7. Ярошевский АА. Применение математики в геохимии: некоторые типы задач и методы решения. *Соросовский образовательный журнал*. 1996;7:67–73.
8. Алексеенко ВА. *Экологическая геохимия*. Москва: Логос; 2000.
9. Matschullat J, Ottenstein R, Reimann C. Geochemical background – can we calculate it? *Environmental Geology*. 2000;39(9):990–1000. DOI: 10.1007/s002549900084.
10. Reimann C, Filzmoser P, Garrett RG. Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment*. 2005;346(1–3):1–16. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.11.023.
11. Матвеев АВ, Бордон ВЕ. *Геохимия четвертичных отложений Беларуси*. Минск: Беларуская навука; 2013.
12. Лукашев КИ, редактор. *Геохимические провинции покровных отложений БССР*. Минск: Наука и техника; 1969. 476 с.
13. Петухова НН. *Геохимия почв Белорусской ССР*. Минск: Наука и техника; 1987.
14. Власов БП, Жуковская НВ, Ковальчик НВ. Содержание микроэлементов в донных отложениях водоемов и водотоков Беларуси по данным мониторинга. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2017;2:152–162.
15. Садчиков АП, Кудряшов МА. *Экология прибрежно-водной растительности*. Москва: НИИ-Природа; 2004. Совместное издание с РЭФИА.
16. Фомина АА, Тихомирова ЕИ, Кораблева АИ. Анализ содержания тяжелых металлов в высших водных растениях Волгоградского водохранилища в районе агломерации Саратов-Энгельс. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2016;18(2–3):822–826.
17. Лычагин МЮ, Касимов НС, Курьякова АН, Крооненберг СБ. Геохимические особенности аквальных ландшафтов дельты Волги. *Известия РАН. Серия географическая*. 2011;1:100–113.

## References

1. Gigevich GS, Vlasov BP, Vynaev GV. *Vysshie vodnye rasteniya Belarusi: ekologo-biologicheskaya kharakteristika, ispol'zovanie i okhrana* [Higher aquatic plants of Belarus: ecological and biological characteristics, use and protection]. Minsk: Publishing center of Belarusian State University; 2001. Russian.
2. Zyryn NG, Obukhov AI. *Spektral'nyi analiz pochv, rastenii i drugikh biologicheskikh materialov* [Spectral analysis of soils, plants and other biological materials]. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 1977. Russian.
3. Shimanovich VM, Akudovich SA. [To the method of calculating of microelements average values in samples which are truncated by lower detection limit]. *Litasfera*. 2000;13:144–147. Russian.
4. Shashulovskaya EA. On heavy metal accumulation in higher aquatic vegetation of the Volgograd reservoir. *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal*. 2009;4:357–360. Russian.
5. Grishantseva ES, Safronova NS, Kirpichnikova NV, Fedorova NP. Distribution of microelements in higher aquatic plants in the Ivan'kovskoe water reservoir. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. 2010;3:223–231. Russian.
6. Mikryakova TF. Accumulation of heavy metals by macrophytes at different levels of pollution of aquatic medium. *Vodnye resursy*. 2002;29(2):253–255. Russian.
7. Yaroshevsky AA. Mathematics for geochemistry: some types of problems and solution techniques. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal*. 1996;7:67–73. Russian.
8. Alekseenko VA. *Ekologicheskaya geokhimiya* [Ecological geochemistry]. Moscow: Logos; 2000. Russian.
9. Matschullat J, Ottenstein R, Reimann C. Geochemical background – can we calculate it? *Environmental Geology*. 2000;39(9):990–1000. DOI: 10.1007/s002549900084.
10. Reimann C, Filzmoser P, Garrett RG. Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment*. 2005;346(1–3):1–16. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2004.11.023.
11. Matveev AV, Bordon VE. *Geokhimiya chetvertichnykh otlozhenii Belarusi* [Geochemistry of quaternary sediments of Belarus]. Minsk: Belaruskaja navuka; 2013. Russian.
12. Lukashov KI, editor. *Geokhimicheskie provintsii pokrovnykh otlozhenii BSSR* [Geochemical provinces of superficial deposits of the BSSR]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1969. 476 p. Russian.
13. Petuhova NN. *Geokhimiya pochv Belorusskoi SSR* [Geochemistry of soils of the Belorussian SSR]. Minsk: Nauka i tekhnika; 1987. Russian.
14. Vlasov BP, Zhukovskaya NV, Kavalchik NV. Trace elements contents in Belarusian reservoirs and rivers bottom sediments according to monitoring. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology*. 2017;2:152–162. Russian.
15. Sadchikov AP, Kudryashov MA. *Ekologiya pribrezhno-vodnoi rastitel'nosti* [Ecology of coastal aquatic plants]. Moscow: NIA-Priroda; 2004. Co-published by the REFIA. Russian.
16. Fomina AA, Tihomirova EI, Korableva AI. The analysis of heavy metals content in the higher aquatic plants of Volgograd water storage basin around Saratov-Engels agglomeration. *Izvestiya of the Samara Science Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2016;18(2–3):822–826. Russian.
17. Lychagin MYu, Kasimov NS, Kuryakova AN, Kroonenberg SB. *Geokhimicheskie osobennosti akval'nykh landshaftov del'ty Volgi* [Geochemical specific features of aquatic landscapes of the mouth delta of the Volga river]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 2011;1:100–113. Russian.

Статья поступила в редакцию 30.09.2018.  
Received by editorial board 30.09.2018.