

УДК 581.5:581.52:581.526.3:574.5(282)(476.2-2 Гом)

## Содержание тяжелых металлов в растениях различных экологических групп водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий

Т. В. МАКАРЕНКО

### Введение

Растительной клетке присуща способность активно поглощать вещества, необходимые для ее жизнедеятельности, против градиента концентрации и активно накапливать их. Благодаря этому свойству растения накапливают микроэлементы в концентрациях, в сотни раз превышающих их содержание в грунте и в тысячи раз — в воде [1–4]. Группа ученых [5] отмечает способность макрофитов концентрировать некоторые элементы в количествах, больших, чем в хирономидах и рыбах.

Химический состав растений определяется не только средой обитания, но и различной поглотительной способностью самих растений по отношению к разным элементам. Это было доказано многочисленными полевыми наблюдениями [1, 2, 4].

**Целью работы явилось** изучение уровней накопления некоторых тяжелых металлов высшими водными растениями различных экологических групп и выявление тест-объектов для проведения экологического мониторинга водоемов.

### Материалы и методы

Отбор проб высших водных растений производился с мая по август 2000-2002 гг. в водоемах г. Гомеля и прилегающих территорий, различающихся по степени антропогенной нагрузки. В процессе выполнения работы собраны макрофиты, широко распространенные в водоемах Беларуси, которые относятся к 4 экологическим группам: I – свободноплавающие неприкрепленные – ряска малая (*Lemna minor* L.) и водяной орех (*Trapa natans* L.); II – плавающие прикрепленные растения – кубышка желтая (*Nuphar luteum* (L) Sm.) и горец земноводный (*Polygonum amphibium* L.); III – подводные (погруженные) растения – элодея канадская (*Elodea canadensis* Rich.), роголистник погруженный (*Ceratophyllum demersum* L.), рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus* L.); IV – надводные (земноводные или воздушно – водные) растения – стрелолист обыкновенный (*Sagittaria sagittifolia* L.), сусак зонтичный (*Vallisneria spiralis* L.), частуха подорожниковая (*Alisma plantago-aquatica* L.), манник наплывающий (*Gluceria fluitans*), болотница болотная (*Eleocharis palustris*), камыш озерный (*Scirpus lacustris* L.), тростник обыкновенный (*Phragmites communis* Trin) [4].

Анализировалась надземная часть макрофитов. Исключение составляли растения I-ой экологической группы со слабо развитой корневой системой, которые анализировались полностью. Макрофиты II-ой и IV-ой групп срезались как можно ближе ко дну водоема. Для III-ей группы использовались «грабельки» [6]. Пробы растений после тщательного ополаскивания последовательно высушивали до воздушно-сухого состояния и озоляли до белой золы в муфельной печи при 450°C [7]. Содержание металлов в золе растений определяли атомно-эмиссионным спектральным методом на спектрофотометре IGSM в лаборатории физико-химического анализа Института геохимии и геофизики НАН Беларуси.

### Результаты и их обсуждение

Проведенные исследования показывают, что концентрация всех изучаемых металлов значительно варьирует для разных видов макрофитов, принадлежащих к одной группе, ото-

бренных как в разных водоемах опробования, так и в одном водоеме. Значительно варьирует и среднее содержание изучаемых металлов у представителей разных групп, отобранных в одном водоеме, что отмечается и в литературе [4]. О том, что размах «нормальных» концентраций химических элементов в растениях одного вида выглядит большим, сообщается во многих работах [1–4, 8, 9,]. Исследования 45 видов водных растений различных экологических групп показали [10], что существует не только широкая межвидовая, но и внутривидовая изменчивость емкости и селективности поглощения различных элементов.

Таблица 1 – Содержание тяжелых металлов (мг/кг сухого веса) в растениях различных экологических групп

Показатель	Свинец	Медь	Цинк	Марганец	Кобальт	Хром	Никель
Растения I экологической группы							
Мин-Макс	2,61-8,58	3,60-35,20	51,80-51,80	1235-5069	2,44-5,72	2,13-58,14	1,85-46,20
Среднее по группе	5,52	16,93	51,80	2429	4,11	17,55	15,35
Растения II экологической группы							
Мин-Макс	0,67-22,45	1,48-10,21	20,14-38,48	176-985	0,20-3,60	0,46-15,21	0,71-13,38
Среднее по группе	5,13	3,65	30,26	454	1,28	2,55	2,99
Растения III экологической группы							
Мин-Макс	2,62-9,37	4,43-19,64	30,57-107,25	338-3513	0,85-6,64	1,00-29,72	1,91-38,63
Среднее по группе	5,11	8,07	63,22	2029	3,21	6,50	7,39
Растения IV экологической группы							
Мин-Макс	1,23-5,83	0,91-15,36	16,20-89,42	214-1410	0,16-1,96	0,57-13,15	0,82-9,46
Среднее по группе	2,75	6,93	43,67	608	0,75	4,11	3,41

При сопоставлении особенностей накопления тяжелых металлов растениями различных экологических групп водоемов опробования выяснилось (таблица 1), что химический состав изучаемых растений отражает типичную для абсолютного большинства макрофитов картину количественного соотношения металлов [3, 11, 12]: высокое содержание марганца, величина которого у растений I-ой группы достигает 2427,0 мг/кг сухого вещества; затем на один-два порядка ниже содержание цинка; далее в пределах до 10,0 мг/кг располагаются медь (исключая плавающие неприкрепленные растения); в пределах до 8,0 мг/кг – хром и никель (исключение также составляют растения I-ой группы); в пределах до 6,0 мг/кг – кобальт и свинец. Содержание марганца в растениях изучаемых водоемов превышает концентрацию остальных металлов в 33-590 раз, а цинка – в 5-18 раз. Концентрация марганца имеет значительные различия у растений разных экологических групп: у гидрофитов I и III-ей групп металла в 3,5–5,0 раз больше, чем в других группах. Полученные результаты нашли подтверждение в литературе [1-4]. Для меди, кобальта и хрома наблюдается одинаковая тенденция – аномально высокое накопление у представителей I-ой группы и незначительная вариабельность в содержании для растений остальных групп. Самым низким уровнем содержания среди изученных элементов отличается кобальт, особенно у макрофитов IV-ой группы.

Результат сравнения средних величин, полученных в исследованиях, с фоновым содержанием металлов в водоемах республики (таблица 2) следующий: концентрация хрома и никеля (на один, а иногда и два порядка), цинка (на порядок), марганца в 1,5 – 8,0 раза, меди в 2,0 – 5,0 раза (исключение – растения II-ой группы) и свинца в 1,2 – 2,3 раза превышает фон. Накопление марганца в гидрофитах изучаемых водоемов и в водоемах республики заметно выше уровня его естественного содержания в растениях, приводимого в литературных источниках, а в некоторых случаях концентрация марганца намного превышает уровень токсичности [1, 2, 9]. Вероятной причиной этого явления могут быть региональные геохими-

ческие особенности распределения марганца в почвах и донных отложениях изучаемых территорий и, соответственно, в растениях водоемов.

Таблица 2 – Содержание тяжелых металлов в гидрофитах водоемов и водотоков Беларуси (мг/кг сухого веса) по данным [1, 2]

Элемент	Среднее содержание в растениях по литературным данным*	Содержание в гидрофитах по данным натуральных наблюдений		
		Среднее фоновое	Максимальное в чистых водоемах и водотоках	Максимальное в загрязненных водоемах и водотоках
Хром	2,0–5,0	0,34	11,25	43,0
Никель	0,05–5,0	0,30	11,25	40,8
Цинк	15,0–100,0	1,41	42,10	177,5
Медь	2,0–15,0	3,48	32,60	135,5
Свинец	0,1–5,0	2,38	12,63	832,9
Марганец	Токсичное > 500	301,15	3180,50	3180,5

\* Данные, используемые в работах [1, 2]

Как указывается в литературе [1, 2], максимальные количества никеля, меди, свинца и хрома по республике определены в макрофитах водоемов Гомеля и, реже, Могилева. Однако максимальные уровни накопления металлов в загрязненных водоемах республики, приведенные в таблице 2, выше данных, установленных для изучаемых водоемов в 3,0 раза и более. Исключение составляют концентрации марганца для представителей I и III-ей групп и никеля для растений I-ой группы, собранных в водоемах опробования, превышающие аналогичные показатели в загрязненных водоемах республики более чем в 1,2 раза. Количество цинка в макрофитах изучаемых территорий не достигает уровня загрязненных водоемов республики. Высокая концентрация никеля в растениях водоемов Гомеля и окрестностей, очевидно, обуславливает и немалое содержание других элементов, так как, по мнению Мура Д. В. и Рамамурти С. [13], для большинства водных растений никель является высокотоксичным элементом и способствует увеличению проницаемости клеточных оболочек, что повышает их чувствительность к воздействию других металлов. По данным тех же авторов [13], количество хрома в растениях незагрязненных областей редко выходит за верхнюю границу 5 мг/кг. Превышение данной величины у растений I-ой группы в изучаемых водоемах, составляющее, в среднем, 3,5 раза, может свидетельствовать о загрязнении воды водоемов Гомеля и близлежащих территорий, хотя о факторах, влияющих на поглощение хрома водными растениями, известно относительно мало [13]. По обобщенным данным Кабата–Пендиас А. и Пендиас Х. [9], содержание свинца редко превышает 3,0 мг/кг, а цинка – 45 мг/кг. В таком случае растения изучаемых водоемов загрязнены и свинцом, и цинком (исключение IV-ая группа, а для цинка и II-ая группа). Но, вместе с тем, макрофиты водоемов опробования не выходят на первое место в республике по количеству загрязнителей. Все вышесказанное указывает на неблагоприятное, но отнюдь не критическое состояние водной растительности водоемов Гомеля и окрестностей. Более низкое содержание металлов в изучаемых макрофитах по отношению к результатам исследования, полученным коллегами из Лаборатории озераведения БГУ для г. Гомеля [1, 2], говорит о протекании процессов самоочищения внутри водоемов и, возможно, о снижении поступления токсикантов в водоемы опробования. Также следует учесть, что высокие уровни накопления металлов в растительности не всегда сопровождаются загрязнением почв (а для водных растений – донных отложений), что связано с внекорневым поступлением части тяжелых металлов в наземные органы растений [9, 14]. Значительные количества металлов в растениях водоемов Гомеля и прилегающих территорий могут являться следствием загрязнения воздушных масс города.

Если провести сравнение полученных в настоящих исследованиях данных с фоновыми концентрациями металлов в растениях р. Березины в пределах Березинского биосферного заповедника [4], то следует отметить, что представители водоемов опробования сильно загрязнены изучаемыми металлами, за исключением марганца. Для р. Березины содержание хрома, свинца, никеля и цинка в макрофитах было ниже предела обнаружения, концентрация меди и кобальта изменялась в пределах 1–10 мг/кг. Но в растениях загрязненной р. Свислочь соединений цинка, никеля, хрома и меди на порядок, а свинца и кобальта, в среднем, в 2–8 раза больше, чем у представителей водоемов г. Гомеля и близлежащих территорий [4].

Максимальное содержание всех изучаемых элементов, за исключением цинка, наблюдается у растений I-ой экологической группы, что было отмечено и другими исследователями [15, 16, 17]. В наибольшей степени эта разница заметна для меди, никеля и хрома. В литературных источниках указывается на тот факт, что чем больше растение связано с водой, тем в большей степени в его тканях накапливаются медь, свинец и цинк [18], а свободноплавающие гидрофиты I-ой группы получают элементы минерального питания преимущественно из воды [1-3, 8, 16]. Очевидно, высокое содержание элементов у представителей данной группы характеризует общий высокий уровень содержания тяжелых металлов в воде водоемов опробования, а также их доступность в водных массах для растений. Известно, что представители I-ой группы могут поглощать токсиканты также и из воздушных масс [9, 14]. У плавающих неприкрепленных растений отмечено максимальное содержание свинца, а, как указывается в литературе, переносимый по воздуху свинец – главный источник свинцовых загрязнений и легко поглощается растениями через листву [9].

Наряду с плавающими неприкрепленными гидрофитами в водоемах опробования подводные растения III-ей группы также отличаются достаточно высокой концентрацией изучаемых металлов. Наличие у представителей III-ей группы сильно развитых, рассеченных листьев со значительной площадью сорбции способствует активному усвоению металлов не только из донных отложений, но и, частично, из воды. Большинство исследователей указывают на более высокую аккумулирующую способность подводных растений III-ей группы, в сравнении с макрофитами I-ой группы [1-3, 8, 19]. Но в изучаемых водоемах подводные растения уступают свободноплавающим по уровню аккумуляции металлов: у макрофитов III-ей группы определена максимальная концентрация только цинка. Это может служить подтверждением значительного вклада аэрального поступления токсикантов в водоемы опробования наряду с поверхностным стоком и несанкционированными сбросами. Содержание тяжелых металлов у погруженных растений в 1,5–10 раз выше, чем у макрофитов IV-ой группы. На образование единицы биомассы рдест (III-я группа) поглощает в два раза больше элементов минерального питания, чем тростник (IV-ая группа) [20]. Это свидетельствует о высокой поглотительной способности погруженных растений и об их очистительной роли в водоеме [20].

Растения II и IV-ой групп характеризуются относительно невысокими уровнями накопления тяжелых металлов, что отмечалось и другими исследователями [4]. Среднее содержание свинца и никеля у растений данных групп различается незначительно. Накопление кобальта у представителей II-ой экологической группы выше, чем у макрофитов IV-ой группы, тогда как минимальное содержание всех остальных изученных элементов, отмечено у плавающих прикрепленных растений. Минимальный уровень накопления металлов представителями II и IV-ой групп (особенно II-ой группы) делают их менее пригодными для использования при проведении экологического обследования водоемов. Растения I-ой и III-ей групп могут рассматриваться как приоритетные объекты при техногеохимических индикациях и мониторинге, на что указывают и другие авторы [1, 2, 4]. Погруженная растительность наиболее полно характеризует состояние гидроэкосистемы и изменения, происходящие в водоеме, так как отличается наибольшей способностью к накоплению химических элементов [1, 2].

### Заключение

Изучение содержания каждого из металлов в водной растительности водоемов опробования позволило получить следующие ряды накопления:

I гр. : Mn > Zn > Cr > Ni ≥ Cu > Pb > Co

II гр.: Mn > Zn > Pb > Cu > Ni > Cr > Co

III гр. Mn > Zn > Cu ≈ Ni > Cr > Pb > Co

IV гр. Mn > Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Co

Принадлежность исследованных видов водных растений к различным экологическим группам в значительной мере определяет их способность концентрировать тяжелые металлы. В больших количествах в растениях содержатся так называемые «биометаллы» – марганец и цинк. Медь – высокотоксичный металл для большинства водных растений, более токсичный, чем свинец [13], и накопление его в растениях III и IV-ой групп в значительных количествах говорит о повышенном содержании доступных форм меди в водоемах. Если элементы повышенной концентрации – марганец и цинк – абсолютно преобладают вне зависимости от принадлежности растений к различным экологическим группам, то по градации накопления меди, никеля, свинца и хрома водная растительность экологических групп отличается. И в чистых, и в загрязненных водоемах республики хром и никель располагаются на последних местах по степени накопления [1, 2, 4]. «Продвижение» хрома, никеля и свинца вперед в рядах накопления металлов у макрофитов в водоемах опробования свидетельствует о загрязненности растений хромом и никелем, а в некоторых случаях и свинцом. Самым низким уровнем аккумуляции в растениях среди изученных элементов отличается кобальт.

Полученные в настоящих исследованиях данные подтверждают высокий уровень загрязнения водной растительности водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий изучаемыми металлами. Отмечается неблагоприятное, но отнюдь не критическое состояние водной растительности водоемов городской территории и окрестностей города.

Максимальный уровень накопления изучаемых металлов, за исключением цинка, характерен для представителей I-ой группы. Однако следует учитывать, что для растений группы характерно накопление токсикантов не только из воды водоемов, но и из загрязненных городских воздушных масс. Высокой аккумулярующей способностью отличаются также гидрофиты III-ей группы, для которых основными источниками поступления минеральных компонентов в ткани выступают вода и донные отложения водоемов. Погруженные растения III-ей группы целесообразно использовать для оценки загрязнения водоемов не исключая полностью анализ представителей других экологических групп.

**Резюме.** Элементы повышенной концентрации – марганец и цинк – абсолютно преобладают вне зависимости от принадлежности растений к различным экологическим группам, по градации накопления меди, никеля, свинца и хрома водная растительность экологических групп отличается. Принадлежность исследованных видов водных растений к различным экологическим группам в значительной мере определяет их способность концентрировать тяжелые металлы. Полученные в настоящих исследованиях данные подтверждают высокий уровень загрязнения водной растительности водоемов г. Гомеля и прилегающих территорий изучаемыми металлами. Отмечается неблагоприятное, но отнюдь не критическое состояние водной растительности водоемов городской территории и окрестностей города. Максимальный уровень накопления изучаемых металлов, за исключением цинка, характерен для представителей I-ой группы.

**Abstract.** The concentration of heavy metals in plants of various ecological groups in reservoirs of Gomel and adjacent territories is studied in the paper.

### Литература

1. Власов, Б. П. Использование высших водных растений для оценки и контроля за состоянием водной среды: методические рекомендации / Б. П. Власов, Г. С. Гигевич. – Мн.: Изд-во БГУ, 2002. – 84 с.

2. Гигевич, Г.С. Высшие водные растения Беларуси: Эколого – биологическая характеристика, использование и охрана / Г.С. Гигевич, Б.П. Власов, Г.В. Вынаев. – Мн.: БГУ, 2001. – 231с.
3. Микрякова, Т.Ф. Распределение тяжелых металлов в высших водных растениях Угличского водохранилища / Т.Ф. Микрякова // Экология. – 1994. – № 1. – С. 16–21.
4. Савченко, В.В. Микроэлементы в водных растениях Беларуси (на примере рек Березина и Свислочь) / В.В. Савченко, И.К. Вадковская // Природопользование, 1996. – вып.1 – С. 124–127.
5. Гладышев, М.И. Содержание металлов в экосистеме и окрестностях рекреационного и рыбоводного пруда Бугач / М.И. Гладышев, И.В. Грибовская, Е.А. Иванова и др. // Водные ресурсы. – 2001. – Т. 28: № 3. – С. 320–328.
6. Катанская, В.М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР: Методы изучения / В.М. Катанская. – Л.: Наука, 1981. – 187с.
7. Никаноров, А.М. Биомониторинг тяжелых металлов в пресноводных экосистемах / А.М. Никаноров, А.В. Жулидов, А.Д. Покаржевский. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 143 с.
8. Гигевич, Г.С. Мониторинг высшей водной растительности как метод контроля за трансформацией природной среды / Г.С. Гигевич, Б.П. Власов // Природопользование в условиях дифференцированного антропогенного воздействия. – Minsk: Sosnowies, 2000. – С. 186–192.
9. Кабата–Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. / А. Кабата–Пендиас, Х. Пендиас. – М.: Мир, 1989. – 439с.
10. Adams, F.S. The influence of nutrient pollution levels upon element constitution and morphology of *Elodea canadensis* Rich. in Michx / F.S. Adams, D.R. Mackenzie, H. Cole, W.P. Marilyn // Environ. Pollut. – 1971. – Vol. 1. – P. 285–298.
11. Дикиева, Д. Химический состав макрофитов и факторы, определяющие концентрацию минеральных веществ в высших водных растениях / Д. Дикиева, И.А. Петрова // Гидробиологические процессы в водоемах. – Л.: Наука, 1983. – С. 107–213.
12. Ильин, В.Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение / Ильин В.Б. – Новосибирск: Наука, 1991. – 151с.
13. Мур, Дж.В. Тяжелые металлы в природных водах / Дж.В. Мур, С. Рамамурти. – М.: Мир, 1987. – 288с.
14. Хомич, В.С. Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси / В.С. Хомич, С.В. Карарека, Т.И. Кухарчик. – Минск : РУП «Минсктиппроект», 2004. – 260 с.
15. Микрякова, Т.Ф. Содержание тяжелых металлов в макрофитах Шекснинского плеса Рыбинского водохранилища / Т.Ф. Микрякова // Биология внутренних вод. – 1990. – № 87. – С. 31–34.
16. Микрякова, Т.Ф. Накопление тяжелых металлов макрофитами в условиях различного уровня загрязнения водной среды / Т.Ф. Микрякова // Водные ресурсы. – 2002. – Т. 29, № 2. – С. 253–255.
17. Кадукин, А.И. Аккумуляция железа, марганца, цинка, меди и хрома у некоторых водных растений / А.И. Кадукин, В.В. Красинцева, Г.И. Романова, Л.В. Тарасенко // Гидробиологический журнал. – 1982. – Т. 18, № 1. – С. 79–82.
18. Никаноров, А.М. Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах / А.М. Никаноров, А.В. Жулидов. –Л.: Гидрометеиздат, 1991. –311с.
19. Микрякова, Т.Ф. Тяжелые металлы в макрофитах Рыбинского водохранилища / Т.Ф. Микрякова // Водные ресурсы. – 1996. – Т. 23, № 2. – С. 234–240.
20. Якубовский, К.Б. Самоочищение вод в зависимости от физиологических особенностей высших водных растений / К.Б. Якубовский, А.И. Мережко // Гидробиологический журнал. – 1982. – т. 18, № 2. – С. 62–68.