

Содержание металлов в высших водных растениях в небольшом сибирском водохранилище

Е. А. ИВАНОВА^{1,2}, О. В. АНИЩЕНКО^{1,2}, И. В. ГРИБОВСКАЯ², Г. К. ЗИНЕНКО², Н. С. НАЗАРЕНКО³,
В. Г. НЕМЧИНОВ³, И. В. ЗУЕВ¹, А. П. АВРАМОВ¹

¹Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail:elenivald@mail.ru

²Институт биофизики СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок

³Красноярский государственный аграрный университет
660049, Красноярск, просп. Мира, 90

АННОТАЦИЯ

Изучена динамика содержания металлов в высшей водной растительности (макрофитах) малого водохранилища Бугач за 1998–2006 гг. Сравнительная оценка содержания металлов в шести видах макрофитов (*Typha latifolia* L., *Typha angustifolia* L., *Polygonium amphibium* L., *Potamogeton perfoliatus* L., *Potamogeton pectinatus* L., *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) показала, что концентрации металлов в них в целом не превышают таковые, известные из литературных источников. Кластерный анализ показал, что по содержанию металлов изучаемые виды макрофитов распадаются на две экологические группы: погруженные (гидрофиты) и воздушно-водные растения (гелофиты).

Ключевые слова: макро- и микроэлементы, тяжелые металлы, макрофиты, водохранилище.

Содержание металлов в высших водных растениях сильно варьирует в зависимости от биологической роли, которую они играют в организме. Выделяют две большие группы металлов: макро- и микроэлементы. Большинство металлов – микроэлементы, но потребность в них у растений неодинакова [1, 2]. Практически все микроэлементы являются тяжелыми металлами (ТМ), которые в зависимости от концентрации в среде обитания определяются или как необходимые для организмов микроэлементы (медь, цинк, молибден, кобальт, марганец), или как тяжелые (токсичные для организма) металлы

(ртуть, кадмий, свинец, никель, стронций, таллий и др.) [3–5]. Содержание ТМ в водных организмах, в частности в растениях, используется для адекватной оценки загрязнения водных объектов и миграции металлов по трофическим цепям в водоемах, где высшие водные растения (макрофиты) представляют продуценты [6–8]. Заросли макрофитов способны в процессе роста и развития поглощать, концентрировать и переводить в хелатные формы химические элементы, тем самым снижая концентрации токсичных металлов в водоеме и улучшая качество воды [2, 9]. Цель нашей работы –

изучение концентрации металлов в высших водных растениях малого сибирского водохранилища.

РАЙОН И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Небольшое эвтрофное водохранилище Бугач (56°03' с. ш. и 92°43' в. д.) расположено на северо-восточной окраине г. Красноярска на р. Бугач (вторичный приток р. Енисей) в степной местности, частично занятой пастбищами и полями. Вблизи водоема проходит оживленная автомагистраль. Летом он интенсивно используется для купания, рыболовства и рыболовных мероприятий. Площадь водосбора составляет 116 км², площадь поверхности – 0,32 км², максимальная глубина – 6 м, коэффициент водообмена – около 2,3 объема/год. Вода характеризуется высокими значениями рН (7,7–9,5; среднее 8,6). Высшие водные растения покрывают около 13,5 % площади водохранилища [10–12].

Пробы макрофитов отбирали в июне – августе 1998–2006 гг., используя метод учетных площадок [13], срезая надземную фитомассу. Пробы высших водных растений (стебли и листья) промывали в проточной воде от песка, ила и гидробионтов и высушивали при температуре 105 °С. Сухую пробу измельчали в лабораторной мельнице, а затем в агатовой ступке – до однородной консистенции. Далее пробы вновь высушивали до постоянной массы. Все отобранные образцы проб минерализовали в смеси азотной и хлорной кислот (1 : 1).

Концентрации Na и K определяли на пламенном фотометре FLAPHO-4 (Carl Zeiss, Jena) в воздушно-пропановом пламени [14, 15]; Ca, Mg – на атомно-абсорбционном спектрометре AAS-1N (Carl Zeiss, Jena) в воздушно-ацетиленовом пламени [16, 17]; Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Ni, Cd, Co, Pb – на спектрофотометре “ААС Квант 2А” [18]; Al, Mo, Ti – на эмиссионном спектрографе PGS-2 (C. Zeiss, Jena) [19]. Анализы проводили в двух повторностях. В качестве эталонов использовали государственные образцы (для эмиссионного анализа микроэлементов в биологических объектах – например, злаковую травосмесь СБМТ-02 3185, зерна пшеницы СБМП-02 3171-85, клубни картофеля СБМК-

02 3169-85). Анализы выполнены в аккредитованной испытательной лаборатории Института биофизики СО РАН (аттестат аккредитации № ГСЭН.RU.ЦОА.086.324).

Всего проанализировано 177 проб высшей водной растительности. Концентрации (мг/г воздушно-сухой массы) металлов определены в объединенных пробах макрофитов и в отдельных видах: рогозе широколистном *Typha latifolia* L., рогозе узколистном *Typha angustifolia* L., горце земноводном *Polygonium amphibium* L., рдесте пронзеннолистном *Potamogeton perfoliatus* L. и гребенчатом *P. pectinatus* L., тростнике южном обыкновенном *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., взятых на разных участках водохранилища Бугач.

Статистическая обработка данных включала расчет среднего (M) и его ошибку (m), коэффициент вариации (CV , %), представляющий процентное соотношение среднеквадратического отклонения к средней арифметической. Для установления зависимости между металлами использован корреляционный анализ [20]. Дендрограммы сходства-различия макрофитов по совокупности концентраций металлов строили методом UPGMA в программе Statistica 6.0 (StatSoft, Inc.). В качестве меры дистанции использовалось евклидово расстояние.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

За девять лет исследований концентрация макроэлементов в объединенных пробах макрофитов сильно варьировала (табл. 1). Высокие концентрации К отмечены в 2000 г. В последующие три года его содержание немного снизилось, но осталось на довольно высоком уровне, а с 2004 г. уменьшилось почти в 2 раза. Концентрация Na постепенно повышалась с 1998 по 2002 г., когда достигла максимального значения, а к 2006 г. снизилась. Максимальные концентрации Ca и Mg обнаружены в 1998 г., минимальные – в 2002 г. Для этих элементов нет четко выраженной динамики по годам. Функция калия и натрия, как и других необходимых растениям элементов, строго специфична. В растениях эти элементы находятся в ионной форме. Калий содержится в основном в цитоплазме и вакуолях клеток, а натрий ва-

Содержание макроэлементов в высших водных растениях водохранилища Бугач

Год	Показатель	Концентрация металлов, г/кг воздушно-сухой массы			
		K	Na	Ca	Mg
1998	<i>M</i>	15,70	3,90	50,20	6,63
	<i>m</i>	3,21	0,17	22,20	2,94
1999	<i>M</i>	13,92	2,97	25,92	5,40
	<i>m</i>	1,45	0,23	6,13	0,84
2000	<i>M</i>	21,35	6,63	19,72	4,53
	<i>m</i>	2,03	0,93	2,18	0,41
2001	<i>M</i>	19,19	3,04	14,84	4,91
	<i>m</i>	3,42	0,95	6,61	1,32
2002	<i>M</i>	19,37	9,43	37,25	5,79
	<i>m</i>	2,58	1,81	7,13	0,59
2003	<i>M</i>	19,94	6,35	19,90	5,34
	<i>m</i>	1,30	0,43	1,93	0,65
2004	<i>M</i>	9,96	8,63	13,29	2,33
	<i>m</i>	1,14	0,87	1,06	0,38
2005	<i>M</i>	10,91	4,51	20,90	3,48
	<i>m</i>	0,56	0,50	2,95	0,31
2006	<i>M</i>	10,86	4,74	36,83	3,15
	<i>m</i>	0,90	0,44	9,92	0,63
M_{98-06}	<i>M</i>	15,38	5,64	24,82	4,39
	<i>m</i>	0,61	0,29	2,05	0,24
	<i>CV, %</i>	52,4	69,2	110,3	71,5

П р и м е ч а н и е. *M* – среднее за вегетационный период, M_{98-06} – среднемноголетнее, *m* – ошибка среднего, *CV* – коэффициент вариации.

жен для транспорта веществ через мембраны, оба элемента входят в так называемый натрий-калиевый насос мембран. Натрий регулирует транспорт углеводов в растении. Кальций относится к той группе элементов, которые не реутилизируются, а накапливаются в клетках в течение жизни растений, в основном в тканях листьев, часто в виде оксалатов кальция. Кроме того, у погруженных растений он может откладываться в виде карбонатов, как инкрустации на клеточных стенках. Магний является основным химическим элементом в молекулах хлорофилла [2, 21].

В межгодовой динамике содержания микроэлементов в объединенных пробах высших водных растений наибольшие концентрации

были: у Mn – в 1998 г., Cr – в 2000 г., Pb – в 2001 г., Mo, Co, V, Ti – в 2002 г., у Fe, Cu, Zn, Ni, Cd – в 2005 г. (табл. 2). В растениях Fe и Mn взаимосвязаны, участвуя в фотосинтетических процессах [22]. Если повышенные концентрации Fe, Mn, Cu и Zn в растениях связаны с их активной физиологической ролью, то значительное валовое содержание Al и Ti в макрофитах не имеет логического объяснения, так как не ясна их роль в метаболизме растений. Вероятно, эти элементы могут накапливаться в растениях пассивно с током воды и задерживаться в клеточных стенках, особенно у гидрофитов, создавая органоминеральные инкрустации, которые при простой промывке растений не удаляются. Значительное содержание этих

Содержание металлов в высших водных растениях водохранилища Бугач

Год	Показатель	Концентрация металлов, мг/кг воздушно-сухой массы												
		Fe	Cu	Zn	Mn	Al	Pb	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Co	Cd
1998	<i>M</i>	1541,00	4,70	32,33	993,33	1920,00	1,17	8,97	8,10	0,38	2,40	261,67	0,53	Н.д.
	<i>m</i>	866,78	1,15	7,67	131,70	1318,23	0,77	5,64	4,58	0,11	1,53	229,53	0,23	»
1999	<i>M</i>	881,20	10,12	25,70	636,40	1375,50	1,02	6,61	5,81	0,23	0,49	146,37	1,20	1,429
	<i>m</i>	300,31	2,79	1,29	161,50	409,03	0,26	1,84	1,11	0,03	0,13	112,52	0,22	0,212
2000	<i>M</i>	1078,42	10,24	43,55	324,05	902,35	0,57	13,24	6,65	0,19	1,89	148,84	0,55	Н.д.
	<i>m</i>	218,88	1,83	5,28	45,56	220,82	0,12	4,01	2,20	0,02	0,38	41,70	0,19	»
2001	<i>M</i>	692,63	5,55	20,75	286,88	882,38	1,43	10,35	6,73	0,59	1,93	94,05	0,79	»
	<i>m</i>	282,28	0,56	1,44	24,38	542,17	0,87	1,98	1,23	0,13	0,89	57,41	0,25	»
2002	<i>M</i>	1651,41	17,44	52,88	536,00	3470,54	0,92	7,60	6,20	0,95	3,71	1022,29	1,57	0,026
	<i>m</i>	224,05	5,96	8,40	88,32	564,87	0,17	0,99	1,00	0,61	0,75	202,73	0,22	0,003
2003	<i>M</i>	468,47	4,63	20,07	248,22	787,75	0,28	5,82	4,81	0,42	1,46	221,59	0,74	0,039
	<i>m</i>	62,86	0,60	1,56	18,75	164,56	0,04	0,58	0,63	0,02	0,26	55,41	0,13	0,010
2004	<i>M</i>	255,48	33,66	16,12	546,50	397,50	0,44	3,04	3,55	0,60	0,66	122,69	0,24	0,028
	<i>m</i>	82,86	7,46	2,28	106,85	69,64	0,14	1,52	1,73	0,16	0,25	38,95	0,09	Н.д.
2005	<i>M</i>	2542,87	157,05	72,12	411,65	Н.д.	0,37	12,09	12,39	Н.д.	Н.д.	Н.д.	0,94	2,786
	<i>m</i>	695,52	35,43	15,60	32,08	»	0,03	2,73	2,37	»	»	»	0,14	2,055
2006	<i>M</i>	711,39	72,88	16,06	326,04	»	0,27	8,77	7,81	»	»	»	1,38	0,095
	<i>m</i>	157,54	10,85	1,27	33,85	»	0,03	0,83	0,69	»	»	»	0,32	0,011
<i>M</i> ₉₈₋₀₆	<i>M</i>	1163,11	50,25	36,23	406,68	1300,89	0,57	8,66	7,30	0,46	1,71	296,71	0,94	0,590
	<i>m</i>	161,33	8,55	3,67	25,81	160,24	0,06	0,70	0,63	0,09	0,20	49,52	0,08	0,410
	<i>CV, %</i>	184,5	226,4	134,9	84,4	131,5	143,2	121,8	114,4	219,0	119,2	178,2	104,2	566,2

Примечание. *M* – среднее за вегетационный период; *M*₉₈₋₀₆ – среднелетнее; *m* – ошибка среднего; *CV* – коэффициент вариации; Н.д. – нет данных.

элементов в растениях объясняется высокими концентрациями Al, Fe, Ca, Mg, K, Na в почвах Красноярской лесостепи из-за минерального состава залегающих пород, представленных преимущественно гранитами, а также серыми песчаниками, мергелями и известняками. В химический состав этих пород входят алюмосиликаты калия, натрия, кальция, железа, магния, оксид кремния и карбонат кальция [23–25].

Концентрации Mo, V и Co по годам варьировали незначительно. Содержание Pb немного увеличилось с 1998 по 2001 г., а затем наблюдалось снижение до минимальных значений в 2006 г. Межгодовая динамика концентраций Cr и Ni не имеет четкой направленности. Наибольшие вариации выражены в межгодовой динамике содержания Cd. В 2005 г. максимальное значение кадмия превышало минимальное в 107 раз.

Корреляционный анализ металлов в объединенных пробах макрофитов показал, что для большинства имеются слабые недостоверные корреляционные связи. Выделилось три группы металлов, где их концентрации достоверно связаны друг с другом. Первая группа с достоверными коэффициентами корреляции связана с медью: Cu–Cr ($r = 0,54$, при $p < 0,05$, $n = 117$), Cu–Ni ($r = 0,57$, при $p < 0,05$, $n = 117$), Cu–Zn ($r = 0,42$, при $p < 0,05$, $n = 117$). Высокий коэффициент корреляции был в паре Cr–Ni ($r = 0,86$, при $p < 0,05$, $n = 117$). Такая связь свидетельствует, что эти две группы металлов имели один источник происхождения, скорее всего связанный с антропогенным поступлением металлов в водоем [26]. Средняя достоверная корреляционная связь отмечена для пары Ca–Mg ($r = 0,62$, при $p < 0,05$, $n = 117$).

Вариабельность концентраций металлов в объединенных пробах макрофитов показывает коэффициент вариации (CV). Наименьшая изменчивость характерна для металлов группы макроэлементов (K, Na, Ca, Mg), наибольшая – для металлов-микроэлементов, самая высокая вариабельность (566,2 %) характерна для Cd. Вероятно, более низкую вариабельность содержания макроэлементов можно объяснить видоспецифичностью макрофитов, а высокую вариацию содержания микроэлементов в растениях – действием

внешних факторов, например антропогенным загрязнением водоема.

Показано, что разные виды водных растений могут избирательно накапливать отдельные химические элементы [27, 28]. Разные виды водных растений, произрастающие в одном водоеме, существенно различались по уровню содержания металлов (табл. 3). Наибольшие концентрации K и Na были у воздушно-водных растений рода *Typha*, а высокие концентрации Ca и Mg – у гидрофитов рода *Potamogeton*. Достоверных различий в содержании этих металлов между видами рдестов и рогозов не выявлено. Среди всех изученных видов у гелофита *Ph. australis* среднемноголетние концентрации K, Na, Ca и Mg были минимальными.

У двух видов рдестов также обнаружены высокие значения содержания Fe, Al, Ti, Co, Cr. Вероятно, что основным местом локализации этих металлов, как уже рассматривалось выше, являются органоминеральные инкрустации клеточных стенок, однако не исключается вариант внутриклеточного содержания этих элементов. В пользу этого факта свидетельствует то, что у воздушно-водных видов *T. latifolia*, *T. angustifolia* и *Ph. australis* содержание железа, алюминия и титана низкое и на этих растениях органоминеральных инкрустаций не образуется. Концентрации Ni и V были выше у *P. pectinatus*, а Pb – у *P. perfoliatus*, но эти различия статистически недостоверны. Высокие концентрации Mn отмечены у рогозов, причем содержание этого металла у *T. latifolia* было недостоверно выше, чем у *T. angustifolia*. Наибольшие величины концентрации Cu и Mo выявлены у *Ph. australis*, а Zn и Cd – у вида *P. amphibium* – растения, плавающего на поверхности воды.

По совокупности средних значений макроэлементов (K, Na, Ca, Mg) изучаемые виды можно разделить на две группы: рдесты и прочие виды, что видно из дендрограммы (рис. 1). Дендрограмма, построенная по концентрациям 13 микроэлементов, имеет схожий вид, однако объединение в кластеры произошло при значительно больших евклидовых дистанциях (рис. 2). Биологическое объяснение такой дифференциации может заключаться в принадлежности видов к

Т а б л и ц а 3

Концентрация металлов (мг/кг воздушно-сухой массы, * г/кг воздушно-сухой массы) в некоторых видах высших водных растений водохранилища Бугач

Металл	<i>Polygonum amphibium</i>	<i>Potamogeton pectinatus</i>	<i>Potamogeton perfoliatus</i>	Все виды рдестов	<i>Phragmites australis</i>	<i>Typha latifolia</i>	<i>Typha angustifolia</i>	Все виды рогоза
	<i>M ± m</i>							
K*	12,91 ± 0,56	15,17 ± 1,19	14,66 ± 1,28	14,99 ± 0,88	9,85 ± 0,53	17,85 ± 1,25	16,6 ± 4,24	17,46 ± 1,19
Na*	4,84 ± 0,27	6,08 ± 0,98	5,48 ± 0,68	5,86 ± 0,67	1,90 ± 0,37	6,75 ± 0,53	9,93 ± 1,85	7,09 ± 0,51
Ca*	18,95 ± 0,95	53,03 ± 7,52	46,09 ± 6	56,90 ± 5,35	2,33 ± 0,18	13,78 ± 0,57	8,88 ± 0,46	13,41 ± 0,54
Mg*	4,80 ± 0,20	6,76 ± 0,44	10,71 ± 0,54	8,16 ± 0,44	0,99 ± 0,11	2,50 ± 0,11	2,00 ± 0,23	2,45 ± 0,1
Fe	862,7 ± 118,1	2300,3 ± 198,7	1391,8 ± 265,5	1971,7 ± 170,3	924,0 ± 456,2	853,2 ± 416,9	107,1 ± 26,5	784,2 ± 378,8
Cu	70,6 ± 21,8	63,39 ± 15,96	11,08 ± 2,17	44,47 ± 10,76	106,1 ± 50,6	27,35 ± 6,25	7,38 ± 2,77	27,18 ± 5,79
Zn	62,20 ± 15,43	37,68 ± 3,39	45,65 ± 8,02	40,57 ± 3,63	27,31 ± 3,24	20,48 ± 2,03	18,71 ± 3,18	20,25 ± 1,85
Mn	294,4 ± 29,3	431,8 ± 45,3	319,9 ± 56,4	391,3 ± 35,9	208,9 ± 19,6	550,5 ± 62,5	404,3 ± 45,2	536,8 ± 56,99
Al	1367,5 ± 348,7	2845,8 ± 486,9	2360,7 ± 421,2	2561,4 ± 321,8	39,78 ± 19,29	541,4 ± 187,4	170,0 ± 40,2	502,2 ± 160,4
Pb	0,83 ± 0,19	0,69 ± 0,17	1,13 ± 0,31	0,87 ± 0,16	0,42 ± 0,04	0,23 ± 0,02	0,21 ± 0,09	0,24 ± 0,02
Cr	6,34 ± 0,64	13,80 ± 1,46	10,57 ± 2,46	12,63 ± 1,29	11,07 ± 4,01	5,31 ± 0,92	1,30 ± 0,31	4,97 ± 0,85
Ni	5,37 ± 0,54	14,60 ± 2,03	9,03 ± 1,64	12,59 ± 1,46	7,95 ± 2,5	4,07 ± 0,66	1,30 ± 0,31	3,82 ± 0,61
Mo	0,23 ± 0,02	0,35 ± 0,05	0,38 ± 0,05	0,37 ± 0,04	3,30 ± 2,47	0,42 ± 0,05	0,35 ± 0,09	0,44 ± 0,05
V	1,84 ± 0,41	4,07 ± 0,71	2,30 ± 0,46	3,04 ± 0,43	0,19 ± 0,04	0,77 ± 0,24	0,22 ± 0,02	0,69 ± 0,21
Ti	337,9 ± 124,4	868,6 ± 224,6	481,8 ± 131,4	641,9 ± 125,8	8,00 ± 6,35	108 ± 54,23	9,94 ± 1,23	98,8 ± 47,38
Co	1,21 ± 0,13	1,52 ± 0,17	1,45 ± 0,09	1,50 ± 0,11	0,93 ± 0,34	0,21 ± 0,04	0,02 ± 0,01	0,2 ± 0,04
Cd	3,81 ± 2,95	0,08 ± 0,01	0,09 ± 0,04	0,08 ± 0,01	0,21 ± 0,07	0,05 ± 0,01	Н.о.	0,04 ± 0,00

П р и м е ч а н и е. *M* – среднее за 1998–2006 гг.; *m* – ошибка среднего.

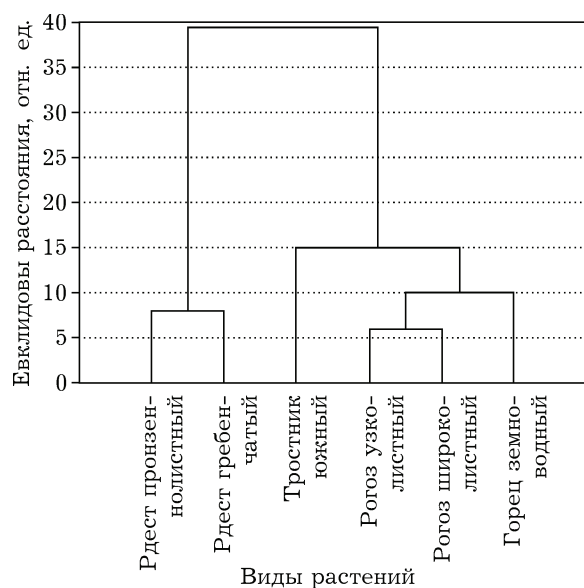


Рис. 1. Дендрограмма кластерного анализа содержания макроэлементов в разных видах макрофитов водохранилища Бугач.

разным экологическим группам: рдестов – к гидрофитам, а рогозов и тростника – к гелофитам. Положение горца земноводного в дендрограмме несколько обособленное, но он включен в группу гелофитов. На наш взгляд, он занимает промежуточное положение, поскольку относится к группе гидрофитов, плавающих на поверхности воды.

Результаты анализа подтверждают гипотезу, что концентрация (и накопление) металлов разными экологическими группами происходит неодинаково. Некоторые авторы считают, что, чем больше растение погружено в воду, тем, как правило, оно интенсивнее накапливает микроэлементы [5, 28, 29]. Вероятно, в этих двух группах пути проникновения ионов металлов могут быть разными. У воздушно-водных растений основной поток ионов связан с транспортом веществ через корневую систему из донных отложений. У гидрофитов могут быть два пути: извлечение ионов металлов корнями из донных отложений и поглощение ионов побегами и листьями из воды.

Так как ПДК (предельно допустимые концентрации) металлов в макрофитах авторам неизвестны, судить о наличии загрязнения водоема тяжелыми металлами можно лишь путем сравнения обнаруженных концентраций

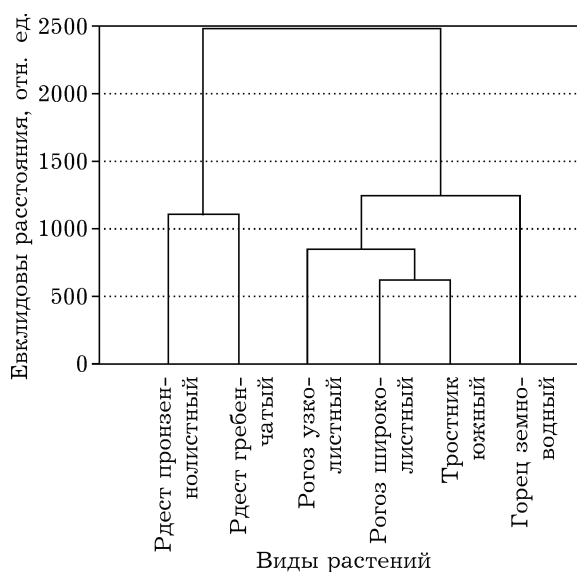


Рис. 2. Дендрограмма кластерного анализа содержания микроэлементов в разных видах макрофитов водохранилища Бугач

в макрофитах с таковыми в других водных экосистемах (табл. 4). По многолетним исследованиям химического состава макрофитов в каскаде волжских водохранилищ сделан вывод об отсутствии в них загрязнения тяжелыми металлами [22, 37, 38].

По абсолютному содержанию в растениях тяжелые металлы подразделяются на четыре группы: элементы повышенной концентрации (Sr, Mn, Fe, Zn), средней (Cu, Ni, Pb, Cr), низкой (Mo, Cd, Se, Co) и очень низкой (Hg) [4]. Среднемноголетние величины содержания металлов в объединенных пробах макрофитов водохранилища Бугач расположились следующим образом (см. табл. 2): $Al > Fe > Mn > Ti > Cu > Zn > Cr > Ni > V > Co > Cd > Pb > Mo$. Последовательности среднемноголетних величин металлов по видам растений (см. табл. 3) представлены следующими ранжированными рядами: горец земноводный – $Al > Fe > Ti > Mn > Cu > Zn > Cr > Ni > Cd > V > Co > Pb > Mo$; рдест гребенчатый – $Al > Fe > Ti > Mn > Cu > Zn > Ni > Cr > V > Co > Pb > Mo > Cd$; рдест пронзеннолистный – $Al > Fe > Ti > Mn > Zn > Cu > Cr > Ni > V > Co > Pb > Mo > Cd$; тростник южный – $Fe > Mn > Cu > Al > Zn > Cr > Ti > Ni > Mo > Co > Pb > Cd > V$; рогоз широколистный – $Fe > Mn > Al > Ti > Cu > Zn > Cr > Ni > V > Mo > Pb >$

Содержание металлов в некоторых видах макрофитов из различных водоемов

Водоем	Вид растения	Концентрация металлов, мг/кг воздушно-сухой массы (* г/кг воздушно-сухой массы)											Источник	
		Fe	Ca*	Mg*	Cu	Zn	Pb	Ni	Mn	Cd	Co	Cr		
Канада, р. Нижняя Нельсон Риве	<i>Rotamogeton pectinatus</i>	-	-	-	10,1	-	29,1	-	-	3,02	-	-	-	[30]
	<i>Rotamogeton pectinatus</i>	-	-	-	13,3	60	0,9	2,8	0,93	-	-	-	1,1	[31]
Северная Греция, оз. Керкини Лэйк	<i>Rotamogeton pectinatus</i>	-	-	-	7,5	66,2	3,2	5,5	525	1,6	-	-	-	[32]
	<i>Rotamogeton pectinatus</i>	-	-	-	5,8	55,2	11,5	27,2	-	0,65	23,7	-	-	[33]
Реки и озера Польши, г. Вроцлав	<i>Polygonum amphibium</i>	-	-	-	3,4-8,2	36,6-156	2,6-3,7	1,2-4,4	-	0,08-0,38	0,98-1,6	-	-	
	<i>Rotamogeton pectinatus</i>	410,6	-	-	4,4	29,2	3,0	6,3	-	0,5	-	-	-	[22]
Россия, Горьковское водохранилище	<i>Phragmites communis</i>	86	12,40	4,46	2,22	1710	8,56	1,70	551	1,29	2,53	1,65	-	[34]
	<i>Typha latifolia</i>	102	8,28	2,72	2,40	1430	11,1	1,77	184	1,59	3,67	1,68	-	
Западная Польша, оз. Бошково	<i>Phragmites communis</i>	85,8	5,61	2,47	2,48	609	9,71	2,22	228	1,27	2,33	1,60	-	[34]
	<i>Typha latifolia</i>	45,7	12,0	1,30	3,60	1220	19,3	1,52	82	1,75	4,10	1,40	-	
Западная Польша, оз. Велки	<i>Phragmites communis</i>	75,9	10,7	7,38	2,10	1300	10,5	1,62	235	1,85	4,55	1,50	-	[34]
	<i>Typha latifolia</i>	47,3	10,7	3,40	2,05	617	6,90	1,50	120	1,25	2,45	1,15	-	[35]
Украина, Запорожское водохранилище	<i>Phragmites australis</i>	38-209	-	-	3,1-6,2	28-46	0,7-1,3	1,7-4,6	29-112	0,02-0,14	0,2-1,0	-	-	
	<i>Typha angustifolia</i>	53-106	-	-	2,2-7,0	34-81	0,6-2,9	2,6-6,0	40-117	0,04-0,18	0,2-1,0	-	-	
Польша, водоемы ландшафтного парка Члаповски	<i>Rotamogeton perfoliatus</i>	1870-870	-	-	6-18	45-186	3,0-6,1	6,2-19	960-1830	0,31-1,5	1,9-5,0	-	-	
	<i>Rotamogeton pectinatus</i>	812-336	-	-	5,3-11,0	36-114	0,6-3,0	5,0-12	169-940	0,14-1,0	0,8-2,3	-	-	[36]
Польша, водоемы ландшафтного парка Члаповски	<i>Phragmites australis</i>	-	-	-	0,78	5,32	30,5	-	-	-	-	-	-	[36]
	<i>Phragmites australis</i> (листья)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Примечание. Прочерк - отсутствие данных.

> Co > Cd; рогоз узколистный – Fe > Mn > Al > Ti > Cu > Zn > Cr > Ni > V > Mo > Pb > Co > Cd. Ранжированные ряды концентраций металлов отличаются у разных видов: у погруженных (рдесты) и плавающих на поверхности воды растений (горец) концентрации металлов снижались в ряду Al > Fe > Ti > Mn, у воздушно-водных растений (тростника и рогозов) снижение проходило в ряду Fe > Mn > Al > Ti. Такая последовательность металлов характерна для высших водных растений разных водоемов, но с некоторыми вариациями [39]. Например, ранжированный ряд концентраций металлов в 33 видах высших водных растений Беларуси выглядел следующим образом: Fe > Mn > Zn > Cu > Pb > Co > Cr > Ni > Cd [40]. Наши данные отличаются более низкими концентрациями свинца и повышенными – кобальта и кадмия, т. е. свинец отнесен в группу низких концентраций.

Средние и максимальные значения Fe в макрофитах анализируемого водоема были сравнимы и даже ниже некоторых лимнических водоемов России, Европы и Северной Америки (см. табл. 4). Концентрации Ca, Mg, Mn, Ni не превышали значений, полученных для разных видов макрофитов волжских водохранилищ, канадских водоемов речной системы Нельсон и оз. Сен-Пьер, водоемов Польши [22, 30, 31, 33, 36]. Такой физиологически активный элемент, как медь, даже при незначительном повышении содержания в питательной среде может быть токсичным, поэтому его концентрация в растениях колеблется обычно в узких пределах: 5–25 мкг/г [1]. Содержание Zn, Pb, Cd и Co в пробах макрофитов было ниже, чем в растениях упомянутых водоемов. Валовое содержание Cr в растениях водохранилища Бугач оказалось почти на порядок больше, а концентрация Cu была выше почти в 2 раза, чем в растениях Запорожского водохранилища и канадских водоемов речной системы Нельсон и оз. Сен-Пьер [30, 35].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований показали, что содержание большинства изученных метал-

лов в макрофитах водохранилища Бугач не превышало значений, полученных для разных видов высших водных растений некоторых российских и зарубежных водоемов, и только по двум металлам (хром и медь) выявлено превышение концентраций. Наименьшая изменчивость характерна для металлов группы макроэлементов (K, Na, Ca, Mg), наибольшая среди металлов-микроэлементов – для Cd. При этом макроэлементный состав более видоспецифичен, чем микроэлементный, на который существенное воздействие оказывают внешние факторы. По совокупности элементного состава металлов два вида рдеста четко отличаются от всей группы макрофитов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мур Дж. В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. М.: Мир, 1987. 287 с.
2. Лукина Л. Ф., Смирнова Н. Н. Физиология высших водных растений. Киев: Наук. думка, 1988. 188 с.
3. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
4. Ильин В. Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. 149 с.
5. Никаноров А. М., Жулидов А. В. Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 312 с.
6. Fernandez J. A., Vazquez M. D., Lopez J., Carballeira A. Modelling the extra and intracellular uptake and discharge of heavy metals in *Fontinalis anti pyretica* transplanted along a heavy metal and pH contamination gradient // Environ Pollut. 2006. Vol. 139. P. 21–31.
7. Анищенко О. В., Гладышев М. И., Кравчук Е. С., Суцник Н. Н., Грибовская И. В. Распределение и миграция металлов в трофических цепях экосистемы реки Енисей в районе г. Красноярск // Водные ресурсы. 2009. Т. 36, № 5. С. 623–632.
8. Анищенко О. В., Гладышев М. И., Кравчук Е. С., Калачева Г. С., Грибовская И. В. Оценка антропогенного загрязнения р. Енисей по содержанию металлов в основных компонентах экосистемы на участках, расположенных выше и ниже г. Красноярск // J. of Siberian Federal University. Biology. 2010. N 3. P. 82–98.
9. Wang T. C., Weissman J. C., Ramesh G., Varadarajan R., Benemann J. R. Parameters for removal of toxic heavy metals by water Milfoil (*Myriophyllum spicatum*) // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 1996. Vol. 57. P. 779–786.
10. Гладышев М. И., Грибовская И. В., Иванова Е. А., Москвичева А. В., Мучкина Е. Я., Чупров С. М. Содержание металлов в экосистеме и окрестностях

- рекреационного и рыбоводного пруда Бугач // Водные ресурсы. 2001. Т. 28, № 3. С. 320–328.
11. Gladyshev M. I., Gribovskaya I. V., Moskvicheva A. V., Muchkina E. Y., Chuprov S. M., Ivanova E. A. Content of metals in compartments of ecosystem of a Siberian pond // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2001. Vol. 41, N 2. P. 157–162.
 12. Гладышев М. И., Чупров С. М., Колмаков В. И., Дубовская О. П., Кравчук Е. С., Иванова Е. А., Трусова М. Ю., Сущик Н. Н., Калачева Г. С., Губанов В. Г., Прокопкин И. Г., Зуев И. В., Махутова О. Н. Биоманипуляция “top-down” в небольшом сибирском водохранилище без дафний // Сиб. экол. журн. 2006. № 1. С. 55–64.
 13. Катанская В. М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. Методы изучения. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1981. 187 с.
 14. ГОСТ 30503 – 97. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Пламенно-фотометрический метод определения содержания натрия. Межгосударственный стандарт. Официальное издание. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск, 1997. 8 с.
 15. ГОСТ 30504 – 97. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Пламенно-фотометрический метод определения содержания калия. Межгосударственный стандарт. Официальное издание. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск, 1998. 11 с.
 16. ГОСТ 26570 – 95. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания кальция. Межгосударственный стандарт. Официальное издание. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск, 1995. 16 с.
 17. ГОСТ 30502 – 97. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Атомно-абсорбционный метод определения содержания магния. Межгосударственный стандарт. Официальное издание. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск, 1998. 8 с.
 18. ГОСТ 30692 – 2000. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Атомно-абсорбционный метод определения содержания меди, свинца, цинка и кадмия. Межгосударственный стандарт. Официальное издание. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск, 2000. 8 с.
 19. ГОСТ 30538 – 97. Продукты пищевые. Методика определения токсичных элементов атомно-эмиссионным методом. Межгосударственный стандарт. Официальное издание. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск, 1997. 27 с.
 20. Лакин Г. Ф. Биометрия. М.: Высш. школа, 1980. 993 с.
 21. Медведев С. С. Физиология растений. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2004. 336 с.
 22. Микрякова Т. Ф. Тяжелые металлы в высших водных растениях Горьковского водохранилища // Водные ресурсы. 1998. Т. 25, № 5. С. 611–613.
 23. Бугаков П. С., Горбачева С. М., Чупрова В. В. Почвы Красноярского края. Красноярск: Кн. изд-во, 1981. 128 с.
 24. Москвичева А. В. Закономерности распределения и миграции металлов по трофическим цепям в водохранилище на реке Бугач: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Борок, 2002. 23 с.
 25. Спицына Т. П. Система оценки загрязнения естественных водотоков Красноярского промышленного региона: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2005. 174 с.
 26. Zhou H. Y., Cheung R. Y. H., Chan K. M., Wong M. H. Metal concentrations in sediments and *Tilapia* collected from inland waters of Hong Kong // Water Res. 1998. Vol. 32 (11). P. 3331–3340.
 27. Микрякова Т. Ф. Накопление тяжелых металлов макрофитами в условиях различного уровня загрязнения водной среды // Водные ресурсы. 2002. Т. 29, № 2. С. 253–255.
 28. Григорьян Б. Р., Бойко В. А., Калимуллина С. Н., Фасхутдинова Т. А., Родионова Е. В., Аксенов В. С. Тяжелые металлы в некоторых компонентах наземной и водной экосистем долины р. Меши // Экология. 1996. № 4. С. 249–252.
 29. Леонова Г. А., Бычинский В. А. Гидробионты Братского водохранилища как объекты мониторинга тяжелых металлов // Водные ресурсы. 1998. Т. 25, № 5. С. 603–610.
 30. Pip E., Stepaniuk J. Cadmium, copper and lead in sediments and aquatic macrophytes in the Lower Nelson River System, Manitoba, Canada. I. Interspecific differences and macrophyte – sediment relations // Arch. Hydrobiol. 1992. Vol. 124, N 3. P. 337–355.
 31. St-Cyr L., Cambell P. G. C., Guertin K. Evaluation of the role of submerged plant beds in the metal budget of a fluvial lake // Hydrobiologia. 1994. Vol. 291. P. 141–156.
 32. Sawidis T., Chettri M. K., Zachariadis G. A., Atratis J. A. Heavy metals in aquatic plants and sediments from water systems in Macedonia, Greece // Ecotoxicology and Environmental Safety. 1995. Vol. 32. P. 73–80.
 33. Samecka-Cymerman A., Kempers A. J. Bioaccumulation of heavy metals by aquatic macrophytes around Wroclaw, Poland // Ibid. 1996. Vol. 35. P. 242–247.
 34. Szymanowska A., Samecka-Cymerman A., Kempers A. J. Heavy metals in three lakes in West Poland // Ibid. 1999. Vol. 43. P. 21–29.
 35. Федоненко Е. В., Филиппова Е. В. Оценка уровня загрязнения запорожского водохранилища тяжелыми металлами // Учен. записки ТНУ. Сер. Биология, химия. 2008. Т. 21 (60), № 2. С. 1–6.
 36. Wierk D., Szpakowska B. Occurrence of heavy metals in aquatic macrophytes colonising small aquatic ecosystems // Ecological chemistry and engineering. 2011. Vol. 18, N 3. P. 369–384.
 37. Микрякова Т. Ф. Распределение тяжелых металлов в высших водных растениях Угличского водохранилища // Экология. 1994. № 1. С. 16–21.
 38. Микрякова Т. Ф., Папченков В. Г. Накопление тяжелых металлов в сусаке зонтичном (*Butomus umbellatus* L.) в Волжском плесе Рыбинского водохранилища // Биология внутренних вод. 2000. № 3. С. 106–110.

39. Branković S., Pavlović-Muratspahić D., Topuzović M., Glišić R., Banković D., Stanković M. Environmental study of some metals on several aquatic macrophytes // *African J. of Biotechnology*. 2011. Vol. 10(56). P. 11956–11965.
40. Познак С. С., Жильцова Ю. В., Романовский Ч. А. Оценка аккумуляции тяжелых металлов и образование антиоксидантных веществ в растениях Беларуси // *Труды БГУ*. 2010. Т. 5, ч. 1. С. 89–93.

Metal Content in Higher Aquatic Plants in a Small Siberian Water Reservoir

E. A. IVANOVA^{1,2}, O. V. ANISHCHENKO^{1,2}, I. V. GRIBOVSKAYA², G. K. ZINENKO²,
N. S. NAZARENKO³, V. G. NEMCHINOV³, I. V. ZUEV¹, A. P. AVRAMOV¹

¹*Siberian Federal University*
660041, Krasnoyarsk, Svobodniy ave., 79
E-mail:elenivald@mail.ru

²*Institute of Biophysics SB RAS*
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok

³*Krasnoyarsk State Agricultural University*
660049, Krasnoyarsk, Mira ave., 90

Dynamics of metal content in higher aquatic plants (macrophytes) in a small water reservoir Bugach during the years 1998–2006 was studied. A comparative estimation of metal content in six macrophyte species (*Typha latifolia* L., *Typha angustifolia* L., *Polygonium amphibium* L., *Potamogeton perfoliatus* L., *Potamogeton pectinatus* L., *Phragmites australis*(Cav.) Trin. ex Steud.) showed that metal concentrations in them generally do not exceed those known from literature. Cluster analysis showed that the macrophyte species under study form two ecological groups with respect to metal content: submerged plants (hydrophytes) and emergent aquatic plants (heliophytes).

Key words: macro and micro elements, heavy metals, macrophytes, water reservoir.