



УДК 502/504+58
ББК 20.1+28.5

О НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ВЫСШЕЙ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ НА ВОЛГОГРАДСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

А.И. Кочеткова

Изучены особенности накопления тяжелых металлов высшей водной растительностью в условиях Волгоградского водохранилища. Установлены корреляционные связи между Fe, Ni, Cr, Co, Mn, Cu, Zn, Pb и ряды накопления их в золе макрофитов. Выявлены виды индикаторы Sr, Cu, Zn, Pb.

Ключевые слова: *тяжелые металлы, высшая водная растительность, Волгоградское водохранилище, индикатор, коэффициент вариации, геохимический барьер, растения-конценторы.*

Геохимические процессы аквальных ландшафтов представляют научный интерес в связи с их относительно слабой изученностью и постоянным увеличением антропогенной нагрузки на них. Важным объектом рыбохозяйственного и питьевого назначения является Волгоградское водохранилище, которое замыкает сеть гидротехнических сооружений Волжского каскада и вследствие этого находится под суммарным природно-антропогенным воздействием всей сети.

Одним из главных природных компонентов аквального ландшафта является растительность, которая выполняет средообразующую функцию и активно принимает участие в поддержании геоэкологического равновесия в нем. Известно, что на Волгоградском водохранилище макрофиты образуют около 30 % первичной продукции растительных сообществ и зарастание мелководий на 7,5 %, что лишней раз подтверждает их значимость в биогеохимическом круговороте веществ [6, с. 357]. Высшая водная растительность (ВВР) устойчива к кратковременным всплескам загрязнения и способна аккумулировать в больших количествах различные вещества, в том числе и тяжелые металлы

(ТМ) [3, с. 12]. Это позволяет использовать их в качестве биогеохимических индикаторов загрязнения различными токсикантами [2, с. 141].

Цель нашей работы заключалась в изучении особенностей накопления ТМ различными экологическими группами ВВР на Волгоградском водохранилище. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: анализ содержания ТМ в макрофитах и их биогеохимической специализации, а также выявление видов индикаторов.

Материалом для исследования послужили пробы макрофитов, отобранные в ходе экспедиций «Волжского плавучего университета» в период максимальной физиологической активности ВВР (июль) 2006–2008 годов. Образцы ВВР подвергались анализу на портативном рентгенофлуоресцентном кристалл-дифракционном сканирующем спектрометре «Спектроскан» в лаборатории мониторинга водных систем МГУ им М.В. Ломоносова, и в результате было определено валовое содержание тяжелых металлов: Cu, Zn, Pb, Cr, Ni, Co, Fe, Mn (см. рис. 1).

Для анализа отбирались наиболее распространенные в Волгоградском водохранилище виды, относящиеся к различным экологическим группам: гелофиты (прибрежно-водные, или воздушно-водные) – тростник обыкновенный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex. Steud.), рогоз узколистный (*Typha angustifolia* L.); гидрорфиты (настоящие водные растения) – уруть

колосистая (*Myriophyllum spicatum* L.), роголистник темно-зеленый (*Ceratophyllum demersum* L.), рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus* L.), рдест блестящий (*Potamogeton lucens* L.), рдест курчавый (*Potamogeton crispus* L.), элодея канадская (*Elodea canadensis* Michx.).

Макрофиты Волгоградского водохранилища характеризуются высокой вариабельностью содержания ТМ, следовательно, их химический состав определяется не только биогеохимической специализацией, но в значительной степени концентрацией ТМ в среде (см. табл.).

Таким образом, содержание ТМ в основных источниках питания ВВР (вода и донные отложения) на Волгоградском водохранилище пространственно неоднородно и зависит от близости источника загрязнения [4, с. 234].

По отношению к накоплению различных ТМ растительность можно разделить на две группы: «фоновые» виды и виды-концентраты. К первой группе относятся виды, имеющие физиологический барьер при аккумуляции ТМ, чем и определяется их биогеохимическая специализация. Ко вторым относятся виды, в которых содержание ТМ варьируется в больших пределах и в значительной мере зависит от состояния среды [2, с. 164].

Сравнительный анализ коэффициентов вариации дал возможность выделить фоновые виды ($V \leq 40\%$), для которых характерна специализация в накоплении ТМ: Mn, Fe – элодея канадская и тростник обыкновенный; Со – уруть колосистая, роголистник темно-зеленый; Pb – рдест блестящий; Ni – рогоз узколистый; Zn – тростник обыкновенный, рогоз узколи-



Рис. 1. Схема расположения точек отбора проб ВВР на Волгоградском водохранилище*

* Составлено автором.

ный, рдест курчавый, элодея канадская. Следует отметить, что коэффициенты вариации для Cr во всех видах достаточно однородны и не превышают 30 %, и если учесть тот факт, что ВВР способна накапливать ТМ по безбарьерному принципу, то данный элемент пространственно однородно распределен по всей акватории Волгоградского водохранилища. С целью выделения видов-концентраторов мы взяли $V \leq 80$ % и в итоге выявили макрофиты, относящиеся к групповым концентраторам, то есть способные накапливать несколько металлов, зна-

чительно превышающих их содержание в среде. К таким видам относятся тростник обыкновенный (Cu, Ni), роголистник темно-зеленый и рдест пронзеннолистный (Pb, Mn). Таким образом, коэффициент вариации косвенным образом указывает на специфический характер концентрирования металлов [2, с. 163].

По абсолютному содержанию в растениях ТМ подразделяются на четыре группы: элементы повышенной концентрации (Sr, Mn, Fe, Zn), средней (Cu, Ni, Pb, Cr) и низкой (Mo, Cd, Se, Co) [5, с. 107].

Таблица

Статистические параметры распределения ТМ в макрофитах Волгоградского водохранилища

Вид *	Параметры **	Cu	Zn	Ni	Pb	Co	Fe	Mn	Cr	Sr
ТО (20)	1	1 001	248	65	27	7	5 775	3 944	104	518
	2	16	18	2	1	1	2 420	923	43	156
	3	251,3	159,8	18,6	20,3	4,3	4 086,8	1 930,23	62,4	420,2
	4	115,5	34,3	87,7	54,9	49,3	34,3	40	25,6	22,1
РУ (15)	1	1201	185	9	НП	НП	6 150	6 339	61	730
	2	30	101	2	НП	НП	345	538	40	326
	3	263,5	131,9	6,14	НП	НП	3 288,8	2 919,6	55,1	610,3
	4	161,2	23,1	36,3	НП	НП	65	61,5	12,8	27,2
УК (11)	1	280	173	67	30	16	16 205	9 647	135	965
	2	44	39	11	4	5	1 066	488	47	294
	3	122,8	93,2	34,4	17,5	11,3	4 668	3 871,5	72,6	650,8
	4	56,3	37,6	40,7	53,3	32	88	64,2	28,6	36,3
РТ-3 (12)	1	319	194	89	28	16	16 590	17 703	71	949
	2	59	27	10	4	8	825	1 001	57	453
	3	184,4	75,3	46,9	11,5	11,7	6 718,9	3 973	65,4	613,1
	4	46,3	58,8	39,5	83,5	28,3	75,5	119,7	6	28,2
РП (28)	1	229	225	79	63	16	12 030	8 093	120	1 356
	2	7	26	10	1	1	104	243	39	658
	3	96	90,9	32,4	14,6	6,5	4 814,7	1 607	60,4	1 039
	4	58,3	46,5	50,8	126,4	59,5	69	100,8	19,5	20,3
РБ (12)	1	153	148	35	24	13	8 806	4 852	86	—
	2	21	35	7	12	2	103	311	44	—
	3	74	72,9	19,7	18,8	7,4	4 286,6	1 628,1	56,9	—
	4	61,6	46,3	51,3	23,6	42,5	74,9	87,2	22,5	—
РК (14)	1	326	109	52	19	15	11 351	3 073	72	—
	2	127	63	15	8	2	1 007	524	36	—
	3	192,8	86,3	27	12	9	4 482	1 902,8	54,5	—
	4	40,7	19,4	54,5	41,4	59,5	92,9	52,5	24,6	—
ЭК (19)	1	—	63	36	5	—	8 923	1 774	68	1 037
	2	—	32	2	2	—	3 475	725	58	21
	3	39	42,5	18,8	3,5	—	5 736	1 426	63,6	592,7
	4	—	28,5	65,2	42,9	—	38,3	28,9	5,8	71

* Вид: *ТО* – тростник обыкновенный; *РУ* – рогоз узколистый; *УК* – уруть колосистая; *РТ-3* – роголистник темно-зеленый; *РП* – рдест пронзеннолистный; *РБ* – рдест блестящий; *РК* – рдест курчавый; *ЭК* – элодея канадская.

** Параметры – концентрации, мг/кг: 1 – максимальная, 2 – минимальная, 3 – средняя; 4 – коэффициент вариации (V), %; *НП* – ниже предела обнаружения; (...) – количество проб.

В общем виде ряд накопления ТМ в макрофитах Волгоградского водохранилища можно представить следующим образом: Fe > Mn > Sr > Cu > Zn > Cr > Ni > Pb > Co, но есть исключения, касающиеся рдеста блестящего Fe > Mn > Sr > Cu ≤ Zn > Cr > Ni ≤ Pb > Co, рдеста пронзеннолистного Fe > Mn > Sr > Cu ≤ Zn > Cr > Ni > Pb > Co и роголистника темно-зеленого с рдестом курчавым Fe > Mn > Sr > Cu > Zn > Cr > Ni > Pb ≤ Co. Если в предыдущих примерах не изменяется последовательность ТМ и наблюдается парное приравнение некоторых из них, то для элодеи канадской порядок незначительно изменился: Fe > Mn > Sr > Cr > Cu > Zn > Ni > Pb > Co. Из этого следует, что стабильной триадой для всех исследуемых видов являются элементы повышенной концентрации (Fe, Mn, Sr), в отличие от других ТМ в ряде накопления их макрофитами, которые не имеют строгих последовательностей и пределов аккумуляции и зависят от видовой принадлежности растений.

Анализ корреляционной зависимости между содержанием ТМ в растениях и ДО не показал однонаправленной зависимости между ними ($r < 0,5$), что совпадает с исследованиями В.Ф. Бреховских на Иваньковском водохранилище [1, с. 446]. В исследуемой растительности были выявлены различные уровни связи между ТМ. К первому уровню относятся связи с сильной корреляцией Fe-Cr ($r = 0,9$), Fe-Co ($r = 0,83$), Co-Mn ($r = 0,83$), ко второму – со средней корреляцией Fe-Ni ($r = 0,74$), Fe-Mn ($r = 0,61$), Zn-Cu ($r = 0,75$), Zn-Pb ($r = 0,75$) и к третьему – со слабой Ni-Cr (0,56) (рис. 2).

Таким образом, определяющим элементом связи для макрофитов Волгоградского водохранилища является Fe, которое имеет прямую зависимость с Cr, Co, Mn и Ni. Помимо этого, Fe по отношению к другим ТМ наиболее сильно аккумулируется растениями, что объясняется его важной физиологической ролью для макрофитов, а именно: Fe входит в состав ферментов, а также участвует в синтезе хлорофилла, в дыхании и в обмене веществ у растений.

Высокий коэффициент вариации металла в ВВР, наряду со слабыми его корреляционными связями с другими элементами, указывает на отсутствие биологического регулирования данного ТМ макрофитом [2, с. 164]. Синтезируя данные показатели, мы получили следующие виды-индикаторы загрязнения акваландшафта: элодея канадская (Sr с V = 71), тростник обыкновенный и рогоз узколистый (Cu с V = 115,5; V = 161,2 соответственно), роголистник темно-зеленый (Zn с V = 58,8; Pb с V = 83,5) и рдест пронзеннолистный (Pb с V = 126,4).

Для элодеи канадской в 2006 г. максимальные значения Sr были зафиксированы в заливе Дубовка (1037 мг/кг) и заливе Ерзовка (1419 мг/кг), а наименьшее – в заливе Нижняя Добринка (21 мг/кг). Следует отметить, что пространственное распределение Sr в элодее происходит в сторону возрастания вниз по течению. По отношению к Cu удалось установить динамику накопления тростником обыкновенным и рогозом узколистым с 2006 по 2008 год. Распределение концентраций Cu по всему водохранилищу происходит неравномерно. Наивысший пик концентраций Cu в макрофитах приходится на

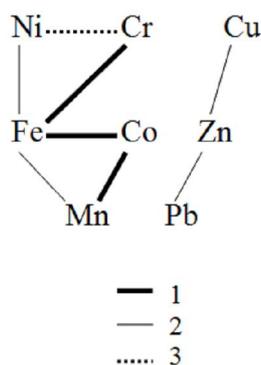


Рис. 2. Уровни связи микроэлементов в золе ВВР заливов Волгоградского водохранилища: 1–3 (r) = 0,8–0,9; 0,6–0,75; 0,5–0,59 соответственно *

* Составлено автором.

2007 г., и, вероятно, это связано с повышенным содержанием данного элемента в окружающей среде. В качестве примера мы рассмотрим содержание Си в тростнике обыкновенном: в заливе Ерзовка с 2006 по 2008 г. оно составило 16 мг/кг; 162 мг/кг; 2,1 мг/кг соответственно и в рогозе узколистом: в заливе Камышинском – 20 мг/кг; 121 мг/кг; 4,3 мг/кг соответственно. Установить динамику содержания Zn в роголистнике темно-зеленом по Волгоградскому водохранилищу с 2006 по 2007 г. нам не удалось в связи с небольшой выборкой общих заливов за два года. Наибольшие концентрации Zn были выявлены в заливе Курдюм – 194 мг/кг в 2007 г. при среднем содержании 75,3 мг/кг по всей акватории. Биогеохимическая индикация Pb возможна при наличии двух видов: роголистника темно-зеленого и рдеста пронзеннолистного. Выявлено, что данные виды с небольшими различиями аккумулируют в себе Pb: так, в заливе Приморском в 2006 г. его содержание в рдесте пронзеннолистном составило 2 мг/кг, в роголистнике темно-зеленом – 7 мг/кг; в 2007 г. в заливе Курдюм – 1 мг/кг и 4 мг/кг; в заливе Маркс – 28 мг/кг и 23 мг/кг соответственно. В 2007 г. наблюдается повышенное содержание Pb в данных видах в среднем: в заливе Ерзовка – 7 мг/кг, в заливе Пичуга – 10 мг/кг, в заливе Дубовка – 6 мг/кг, в заливе Камышинском – 3 мг/кг, в заливе Даниловском – 16 мг/кг, в отличие от 2006 г., где концентрации были ниже порога обнаружения.

Таким образом, ВВР выполняет роль естественного барьера для токсичных веществ. Наличие сильной корреляционной зависимости между Fe, Cr, Co и Mn в макрофитах Волгоградского водохранилища лишней раз под-

тверждает их значимость в биологических процессах растений. По отношению к ТМ макрофиты характеризуются сильной и слабой вариабельностью их содержания, на основании чего можно выделить фоновые виды и виды-концентраторы. По последним можно дать оценку сложившейся пространственно-временной геохимической ситуации на акватории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биохимия макрофитов в аквальных ландшафтах / Н. Ю. Лычагин [и др.]. // ГИС Астраханского заповедника. Геохимия ландшафтов дельты Волги. – М. : Геогр. фак. МГУ, 1999. – Вып. 3 : Геоэкология Прикаспия. – С. 141–164.
2. Микрякова, Т. Ф. Накопление тяжелых металлов в сусаке зонтичном (*Butomus Umbellatus* L.) в Волжском плесе Рыбинского водохранилища / Т. Ф. Микрякова, В. Г. Папченков // Биология внутренних вод. – 2000. – Июль – сент. (№ 3). – С. 106–110.
3. Микрякова, Т. Ф. Содержание тяжелых металлов в макрофитах Моложского плеса Рыбинского водохранилища / Т. Ф. Микрякова // Биология внутренних вод. – 1996. – № 99. – С. 11–13.
4. Микрякова, Т. Ф. Тяжелые металлы в макрофитах Рыбинского водохранилища / Т. Ф. Микрякова // Водные ресурсы. – 1996. – Т. 23, № 2 (март – апр.). – С. 234–240.
5. Особенности накопления тяжелых металлов в донных отложениях и высшей водной растительности заливов Ивановского водохранилища / В. Ф. Бреховских [и др.]. // Водные ресурсы. – 2001. – Т. 28, № 4. – С. 441–447.
6. Шашуловская, Е. А. О накоплении тяжелых металлов в высшей водной растительности Волгоградского водохранилища / Е. А. Шашуловская // Поволжский экологический журнал. – 2009. – № 4. – С. 357–360.

SOME REGULARITIES OF ACCUMULATION OF HEAVY METALS HIGHER AQUATIC VEGETATION AT THE VOLGOGRAD RESERVOIR

A.I. Kochetkova

Specific features of accumulation of heavy metals higher aquatic vegetation in the Volgograd reservoir. Established correlations between Fe, Ni, Co, Mn, Cu, Zn, Pb and ranks them in the ash accumulation macrophytes. Identified types of indicators Sr, Cu, Zn, Pb.

Key words: heavy metals, higher aquatic vegetation, Volgograd Reservoir; indicator, variability index, geochemical barrier, concentrator plants.