

ГИДРОХИМИЯ, ГИДРОБИОЛОГИЯ,
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

УДК 550.4+502.65 (282.247.411.6)

ОСОБЕННОСТИ ГЕОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЭПИФИТОНА
ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА¹⁾

© 2018 г. Е. С. Гришанцева^{1,*}, Л. П. Федорова²

¹⁾Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы

²⁾Государственный научно-исследовательский институт озерного и речного рыбного хозяйства,
Верхне-Волжское отделение
171253 Тверская обл., Конаково, ул. Гагарина, 14

*E-mail: SHES99@mail.ru

Поступила в редакцию 12.06.2015 г.

После доработки 16.06.2016 г.

Впервые исследован химический состав эпифитона Иваньковского водохранилища, определено большое число микро- и макроэлементов (Ag, Al, As, Ba, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nd, Ni, P, Pb, S, Sc, Sr, Ti, V, Y, Yb, Zn, W) с применением современных аналитических методов. Приведена сравнительная характеристика геохимического состава эпифитона макрофитов различных экологических групп на примере Иваньковского водохранилища. Рассмотрена возможность использования эпифитона для биогеохимической индикации антропогенного влияния на водоем.

Ключевые слова: микроэлементы, эпифитон макрофитов, водная экосистема, Иваньковское водохранилище.

DOI: 10.7868/S0321059618030045

ВВЕДЕНИЕ

Эпифитон – сообщество микробиоты (альгофлоры), которое существует в прикрепленном к макрофиту состоянии [8, 9]. Эпифитон, наряду с высшей водной растительностью (ВВР), играет большую роль в продукционных процессах в водоеме, принимает активное участие в процессах миграции и связывания металлов и других загрязняющих веществ, поступающих в водную экосистему. Валовая первичная продукция эпифитона в биотопах литоральной зоны водохранилищ по величине эффективной продукции выше продукции как планктона, так и микрофитобентоса, уступает лишь продукции макрофитов [6, 8, 9]. Эпифитон наиболее распространен в литоральной зоне водоемов, где он зачастую единственный источник первичной продукции. По разным данным, эпифитон может создавать от 10 до 70% общей продукции органического вещества в водоеме [10, 16]. Эпифитная микрофлора обычно составляет наибольшую часть биомассы водорослей мелких водоемов

и литоральной зоны крупных водоемов. В Иваньковском водохранилище мелководная зона занимает значительную часть (48%) Иваньковского водохранилища [7, 18], этим обусловлена высокая степень зарастания водоема ВВР, на которой формируется эпифитон. Видовой состав и структура водорослевого эпифитона изучены достаточно хорошо в связи со способностью организмов служить индикатором качества воды при оценке изменения гидролого-гидрохимических условий водоема [8, 9]. Макро и микроэлементы в составе эпифитона – существенная составная часть потоков вещества в пищевые цепи организмов водной экосистемы, они принимают активное участие в биогеохимических процессах [16]. Однако исследований химического состава эпифитона для понимания его геохимической роли в биогеохимических циклах пресноводных экосистем недостаточно.

Биопродуценты (планктон, макрофиты, эпифитон и т.д.) – источник органического вещества осадков и в процессе своей жизнедеятельности поглощают и накапливают микроэлементы. На барьере отмершего органического вещества происходит сорбционное накопление элементов-примесей.

¹⁾ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16–05–00542).

Известно, что планктоногенное органическое вещество озерных отложений дает начало формированию горючих полезных ископаемых и нередко обладает нефтематеринскими свойствами [11, 12]. Теоретические основы изучения роли планктона в геохимических циклах элементов и процессах осадкообразования заложены в работах [2, 11, 12, 14]. На исследование биогеохимических процессов с участием планктона в континентальных водоемах и процессов осадкообразования с его участием направлены работы [12, 13]. Однако геохимическая роль эпифитона в формировании микроэлементного состава донных осадков различных водных экосистем, в том числе таких антропогенных, как водохранилища, не определена.

Данная работа – продолжение многолетних исследований эколого-геохимического состояния экосистемы Иваньковского водохранилища [4, 5, 17]. Наряду с исследованием абиотических компонентов (донные отложения, почвы водосборной территории, поверхностные, придонные и поровые воды) есть необходимость исследования биотической составляющей экосистемы Иваньковского водохранилища. Биогеохимическая роль различных видов высшей водной растительности Иваньковского водохранилища в процессах миграции микроэлементов и эффективность их использования при экологическом мониторинге обсуждается в работе [5]. Имеется большой опыт использования фитопланктона при биомониторинге загрязнения водных экосистем тяжелыми металлами [16]. Однако сложность отбора проб планктона, необходимость применения специального оборудования затрудняют использование планктона в качестве объекта экологического мониторинга и биоиндикации. Методы биоиндикации, основанные на реакциях планктонных сообществ, применимы, прежде всего, для озер и только с большой осторожностью – для проточных водоемов. На участках водохранилища с речным гидродинамическим режимом собственный планктон не успевает сформироваться и в основном состоит из видов, привнесенных из верхних участков и наследует химический состав среды обитания [12]. Точно определить принадлежность конкретных образцов планктона к данному местообитанию очень сложно из-за постоянного его перемещения с водными массами. Эпифитон функционирует в прикрепленном состоянии на одном и том же месте на протяжении всего жизненного цикла. Известно, что при этом видовой состав фитопланктона идентичен составу эпифитона [9].

Цель настоящих исследований – оценка биогеохимической роли эпифитона в накоплении микроэлементов, а также перспективность использования эпифитона для оценки эколого-геохимического

состояния водной экосистемы на примере Иваньковского водохранилища.

Задачи исследований следующие:

определение химического состава эпифитона на макрофитах различных экологических групп, произрастающих в Иваньковском водохранилище, с применением современных аналитических методов;

оценка концентрационной биогеохимической функции эпифитона и степени накопления различных химических элементов в эпифитоне по величине коэффициентов биологического поглощения (КБП);

оценка современного эколого-геохимического состояния различных участков водохранилища по содержанию микроэлементов в эпифитоне;

оценка возможности использования эпифитона для биогеохимической индикации состояния водохранилища.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Иваньковское водохранилище расположено в Тверской области между городами Тверь и Дубна, это источник питьевого водоснабжения г. Москвы. Полевые исследования проводились на Иваньковском водохранилище в июле 2005 и 2010 гг. Объектом исследования был эпифитон – альгоценозы обрастаний на макрофитах, произрастающих в заливах водохранилища, различающихся по степени антропогенного воздействия: Бабнинский, Перетрусовский, Новосельский, Мошковичский, Омутнинский, а также в Шошинском плесе (рис. 1). В качестве фоновых приняты заливы Бабнинский, Перетрусовский и Новосельский, которые расположены удаленно от крупных источников загрязнения, испытывают незначительное антропогенное воздействие, в них отсутствуют контролируемые источники выпуска сточных вод. Станция в Шошинском плесе также может быть отнесена к фоновому участку, так как находится выше по течению от потенциальных источников загрязнения, расположена вблизи национального парка “Завидово”.

Видовой состав эпифитона Иваньковского водохранилища изучен достаточно хорошо и представлен следующими водорослями, % от общего числа: диатомовыми водорослями (Bacillariophyta) – 48; зелеными водорослями (Chlorophyta) – 28; синезелеными водорослями (Cyanophyta) – 12 и другими видами (пиррофитовые Pyrrophyta, золотистые Chrysophyta, зеленые Chlorophyta, евгленовые Euglenophyta) – 12 [8]. Поскольку гидролого-геохимические факторы играют важную роль в формировании состава эпифитона, образцы были разделены на две группы по условиям произрастания

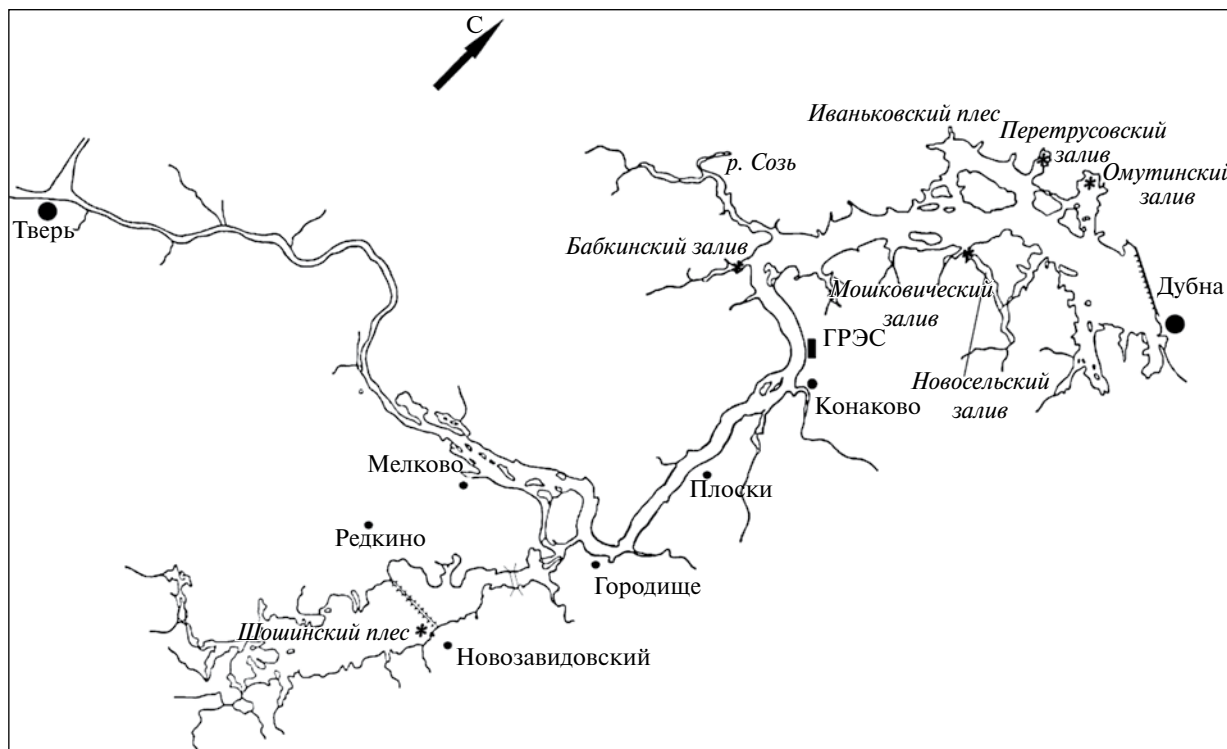


Рис. 1. Схема опробования Иваньковского водохранилища. Звездочки – станции отбора проб эпифитона, макрофитов, воды.

макрофитов-хозяев: эпифитон с макрофитов из группы водно-болотных растений и эпифитон с погруженных видов макрофитов. В исследованную группу макрофитов вошли виды двух экологических групп: гелофиты – водно-болотные растения (манник водяной, камыш озерный, тростник обыкновенный, рогоз узколистный); гидрофиты – погруженные в воду (рдест блестящий, рдест пронзеннолистный, роголистник темно-зеленый).

Ряд исследователей считает, что макрофиты – инертная поверхность для заселения эпифитомом и эпифитон с различных видов макрофитов имеет одинаковый видовой состав. Считается, что хотя тип субстрата и видовые особенности макрофитов оказывают немаловажное влияние на развивающуюся на них альгофлору, но наиболее важны гидролого-геохимические условия среды обитания [1, 8, 9, 23]. Другие исследователи объясняют различие состава водорослей эпифитона с макрофитов разных видов тем, что макрофит-хозяин играет важную роль в формировании эпифитона, как средообразующий фактор [15, 21, 24]. Поскольку в настоящее время не существует единой теории о взаимосвязи между макрофитами и закрепленным на них эпифитомом, в настоящей работе авторы статьи исходили из концепции нейтральных взаимодействий, опираясь на работу [8], где отмечено, что приуроченность водорослей эпифитона к определенному виду макрофита на Иваньковском водохранилище не обнаружена, т.е. проводить

пробоотбор эпифитона можно с макрофита любого вида, не привязываясь к одному “сквозному” виду.

Надкорневую часть растения аккуратно срезали под водой, затем с листьев с помощью жесткой щетки и пластикового скребка счищали образцы эпифитона в чашки Петри, пинцетом удаляли зообентос. Полученные образцы эпифитона высушивали в сушильном шкафу (при $t = 105^{\circ}\text{C}$), растирали в агатовой ступке и хранили в пакетах из кальки. Затем пробы разлагали в микроволновой системе “Discover”: навеску пробы 250 мг заливали 5 мл концентрированной азотной кислоты, нагревали до 200°C , выдерживали 5 мин и охлаждали. Белые хлопья кремневой кислоты отфильтровывали через бумажный фильтр и разбавляли до 25 мл. Содержания Ag, Al, Ba, Ca, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nd, Ni, P, S, Sc, Sr, Ti, V, Y, Yb, Zn определялись методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП) на приборе марки “IRIS Intrepid II XDL Duo”, (“Thermo Electron Corporation”, США) в ГЕОХИ РАН. Содержания As, Pb и Cd определялись методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией (ЭТААС) на приборе марки “Solar MQZ”, (“Thermo Electron Corporation”, США). Для измерения использовали стандарты: “High-purity standards” (части А и В), для измерения серы – стандарт, приготовленный из фиксанала серной кислоты. В качестве стандартных растворов для АЭС-ИСП при определении

основных макро- и микрокомпонентов использовали 23- элементный стандартный раствор “11355 ICP Multi Element Standard IV” фирмы “Merck” (с концентрацией элементов 1000+10 мг/л) и многоэлементные стандартные растворы “ICP-MS68” (части А и В) фирмы “High-Purity Standards” (с концентрацией элементов 100 и 10 мг/л соответственно). Относительное стандартное отклонение меняется от 0.1 до 10% в зависимости от измеряемой концентрации: от 5 до 50 нг/мл – погрешность составляет 5–10%; от 50 нг/мл до 20мкг/л – 0.1–3%.

Во всех заливах в 2010 г. отбирали, кроме образцов эпифитона, пробы поверхностных вод, которые сразу после отбора фильтровали через мембранный фильтр “Владипор” с размером пор 0.45 мкм и подкисляли 0.1 мл концентрированной азотной кислоты на каждые 10 мл пробы для исследования методом АЭС–ИСП. Элементы As, Cd, Pb определяли методом ЭТААС. Для определения Cd, Se, Co, Cr, La, Mo, Nd, Ni, Pb, Sc, V, Y, Yb в природных водах применялся метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП–МС), так как содержание этих элементов в пробах воды было ниже предела обнаружения метода АЭС–ИСП. Определение проводилось на масс-спектрометре “ELEMENT-2” фирмы “Thermo Scientific” на кафедре геохимии геологического факультета МГУ. В 2005 г. в пробах поверхностных вод определялось ограниченное число элементов, главным образом на тяжелые металлы (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Zn).

Образцы высшей водной растительности (ВВР) отбирали в зарастающих заливах. Срезали надкорневую часть растения, промывали ее под проточной водой, высушивали при комнатной температуре, измельчали в мельнице и озоляли при $t = 450^{\circ}\text{C}$. Образцы золы разлагали в смеси кислот ($\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{HCl}$). Для определения элементного состава применяли метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе “ELEMENT-2” фирмы “Thermo Scientific” на кафедре геохимии геологического факультета МГУ. Общий химический состав золы растений определяли рентгено-флуоресцентным методом на спектрометре “AXIOS Advanced” [4].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как известно, биоиндикация может осуществляться не только по ответной реакции организма, но и по накоплению вредных веществ в организме. В этом случае о степени загрязнения природной среды судят по степени аккумуляции поллютанта в организме [16].

Результаты определения содержания микроэлементов в эпифитоне Иваньковского водохранилища

приведены в таблице. Для эпифитона водно-болотных видов макрофитов ряд содержания макроэлементов в 2010 г. таков: $\text{Ca} > \text{K} > \text{P} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{S}$, для микроэлементов: $\text{Fe} > \text{Al} > \text{Mn} > \text{Ba} > \text{Ti} > \text{Sr} > \text{Zn} > \text{V} > \text{Li} > \text{Ce} > \text{Cr} \geq \text{Cu} > \text{Ni} > \text{W} > \text{Pb} > \text{La} > \text{As} > \text{Nd} > \text{Y} > \text{Co} > \text{Sc} > \text{Yb} > \text{Cd} > \text{Mo} > \text{Ag}$. Для эпифитона погруженных видов макрофитов ряд содержания макроэлементов в 2010 г. следующий: $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Na} > \text{P} > \text{S}$; микроэлементов: $\text{Fe} > \text{Al} > \text{Mn} > \text{Sr} > \text{Ba} > \text{Ti} > \text{Zn} > \text{W} > \text{Li} > \text{Ce} > \text{Cu} > \text{As} > \text{V} > \text{La} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Y} > \text{Cr} > \text{Nd} > \text{Co} > \text{Sc} > \text{Ag} > \text{Cd} > \text{Yb} > \text{Mo}$.

По сравнению с эпифитоном погруженных видов, большинство элементов (особенно литофильные и редкоземельные элементы) содержатся в высоких концентрациях в эпифитоне водно-болотных видов макрофитов. Это объясняется большей долей терригенной взвеси в геохимическом составе образцов эпифитона водно-болотных видов растений. Пояс водно-болотных растений находится непосредственно у берега в волноприбойной зоне, в месте интенсивной переработки берега, что сопровождается повышенной мутностью воды. Заросли макрофитов активно перехватывают поверхностный сток, влекомые взвешенные вещества поглощают органические и неорганические соединения. В береговой зоне на геохимический состав эпифитовзвеси оказывают большое влияние литодинамические абиотические факторы, такие как осаждение терригенной взвеси. Так как применяемая методика пробоотбора не позволяет избежать попадания частиц терригенной взвеси в образцы эпифитона, о вкладе терригенной составляющей в образец судили по содержанию литофильных, основных петрогенных и редкоземельных элементов (Al, Fe, Na, K, Ti, Li, Sc). Образцы эпифитона, отобранные с водно-болотных видов макрофитов, в геохимическом смысле – образцы эпифитовзвеси, т.е. смесь твердых частиц речной взвеси и прикрепленных организмов альгофлоры. Впервые использовать эпифитовзвесь для индикации техногенного загрязнения рек в условиях значительного антропогенного влияния предложил Е.П. Янин [20]. Сравнение полученных данных о содержании тяжелых металлов в образцах эпифитона с водно-болотных видов макрофитов и данных [20], полученных для рек, находящихся под техногенным влиянием крупного промышленного центра, показало, что эпифитон Иваньковского водохранилища характеризуется более низкими содержаниями Cd (в среднем в 20 раз), Cu (в 15 раз), Co (в 5 раз), а также более низкими по сравнению с эпифитовзвесью содержаниями литофильных элементов.

Образцы эпифитона с погруженных видов макрофитов, отобранные из разных заливов, удаленных от источников антропогенного влияния (на фоновых участках), имели схожий

Геохимический состав эпифитона Иваньковского водохранилища (n – количество проб; вод-бол. – водно-болотные виды макрофитов, погр. – погруженные виды макрофитов, но – содержание не определяли)

Элемент	Экологическая группа макрофитов	Среднее содержание в эпифитовзвеси на сухую массу		ЕФ 2010 г.	Средний состав пресноводного планктона по [9], мг/кг, %	Кларк глинистого сланца [16]	Среднее содержание в макрофитах в 2010 г., мг/кг сухой массы	Среднее содержание в воде в 2010 г., мкг/л	КБП для эпифитона	КБП для макрофитов
		2005 г. ($n = 10$)	2010 г. ($n = 10$)							
Ag, мг/кг	вод-бол.	но	< 0.1	6	0.024	0.07	0.02	5	2×10^1	4
	погр.	но	0.145	72						
Al, %	вод-бол.	0.21	1.3	0.68	0.17	8	147	50	3×10^5	3×10^3
	погр.	0.13	0.16	0.65						
As, мг/кг	вод-бол.	3.5	11.2	3.5	1.3	13	2.13	< 0.5	2×10^4	4×10^3
	погр.	2.2	3.53	9						
Ba, мг/кг	вод-бол.	310	312	2.5	37	580	7.41	105	3×10^3	7×10^1
	погр.	1196	332	18						
Ca, %	вод-бол.	1.3	2.21	5.8	1.43	1.6	4898	61000	3×10^2	8×10^1
	погр.	1.64	22.9	465						
Cd, мг/кг	вод-бол.	1	0.45	7	0.79	0.3	0.004	0.08	5×10^3	5×10^1
	погр.	2.74	0.125	16						
Ce, мг/кг	вод-бол.	15	21.6	1.2	1.83	70	0.09	0.14	2×10^5	6×10^2
	погр.	4	6.5	3						
Co, мг/кг	вод-бол.	5	6.2	1.3	0.89	19	0.03	0.17	4×10^4	1.8×10^2
	погр.	6	0.5	0.9						
Cr, мг/кг	вод-бол.	16	19.5	0.9	12.6	90	5.45	0.42	5×10^4	1.3×10^4
	погр.	10	1.3	0.5						
Cu, мг/кг	вод-бол.	80	19.5	1.8	18.3	45	0.64	6	3×10^3	1×10^2
	погр.	137	3.7	3						
Fe, %	вод-бол.	0.77	1.33	1.18	0.13	4.72	209	320	4×10^4	6.5×10^2
	погр.	0.8	0.17	1.17						
K, %	вод-бол.	0.16	1.6	2.5	0.59	2.66	24053	4040	4×10^3	6×10^3
	погр.	0.24	0.33	4						
La, мг/кг	вод-бол.	6.75	12.2	1.6	1.08	32	0.04	0.06	2×10^5	6×10^2
	погр.	4	2.9	3						
Li, мг/кг	вод-бол.	8	26.2	1.6	1.8	66	0.34	4	6×10^3	8×10^1
	погруж	5.2	8.7	4.3						
Mg, %	вод-бол.	0.24	0.36	1	0.15	1.5	1523	15320	2×10^2	1×10^2
	погр.	0.46	0.6	13						
Mn, %	вод-бол.	0.3	0.76	38	0.02	0.085	96	220	3×10^4	4×10^2
	погр.	1.47	0.08	30						

(окончание)

Элемент	Экологическая группа макрофитов	Среднее содержание в эпифитовзвеси на сухую массу		EF 2010 г.	Средний состав пресноводного планктона по [9], мг/кг, %	Кларк глинистого сланца [16]	Среднее содержание в макрофитах в 2010 г., мг/кг сухой массы	Среднее содержание в воде в 2010 г., мкг/л	КБП для эпифитона	КБП для макрофитов
		2005 г. (n = 10)	2010 г. (n = 10)							
Mo, мг/кг	вод-бол.	но	0.2	0.3	0.71	2.6	0.01	0.25	8×10 ²	3×10 ¹
	погр.	но	0.1	1.25						
Na, %	вод-бол.	0.1	0.23	1	0.54	0.96	694	5460	4×10 ²	1.3×10 ²
	погр.	0.05	0.06	2						
Nd, мг/кг	вод-бол.	но	10.2	1.4	0.78	31	0.04	0.07	1×10 ⁵	6×10 ²
	погр.	но	0.64	0.7						
Ni, мг/кг	вод-бол.	35	16.7	1	3.7	68	2.42	0.84	2×10 ⁴	3×10 ³
	погр.	52	1.94	1						
P, %	вод-бол.	0.17	0.39	23	1.27	0.07	2058	260	1.5×10 ⁴	8×10 ³
	погр.	0.17	0.05	23						
Pb, мг/кг	вод-бол.	140	12.6	2.6	28	20	0.23	0.35	4×10 ⁴	6×10 ²
	погр.	350	2.07	3						
S, мг/кг	вод-бол.	0.5	0.34	0.0006	но	2400	1850	2360	0.14	8×10 ²
	погр.	0.98	0.09	0.001						
Sc, мг/кг	вод-бол.	1.7	3.12	1	0.33	13	0.008	0.01	3×10 ⁵	8×10 ²
	погр.	4	0.37	1						
Sr, мг/кг	вод-бол.	86	202	2.8	85	300	2.4	350	6×10 ²	7.5×10 ⁰
	погр.	297	607	66						
Ti, мг/кг	вод-бол.	58	245	0.2	127	4600	1.67	1	2.5×10 ⁵	1.7×10 ³
	погр.	56	44.4	0.3						
V, мг/кг	вод-бол.	15.5	26.7	0.9	6.3	130	0.25	0.55	5×10 ⁴	4.5×10 ²
	погр.	4	3.15	0.7						
Y, мг/кг	вод-бол.	10	9	1.5	0.65	26	0.03	0.04	2×10 ⁵	7.5×10 ²
	погр.	4	1.4	2						
Yb, мг/кг	вод-бол.	но	0.79	1	0.074	3.1	0.002	<0.01	8×10 ⁴	2×10 ²
	погр.	но	0.11	1						
Zn, мг/кг	вод-бол.	374	110	4.9	107	95	8.0	9	1×10 ³	8×10 ²
	погр.	733	15.1	5						
W, мг/кг	вод-бол.	14	но	но	но	1.8	но	<10	—	—
	погр.	<10	но	но						

макро- и микроэлементный состав и малую терригенную составляющую. Состав эпифитона с погруженных видов растительности близок к среднему составу пресноводного планктона, по [9], что

подтверждает не только видовую, но и геохимическую идентичность эпифитона и планктона.

Исследование пространственного распределения микроэлементов в эпифитоне Иваньковского

водохранилища выявило следующие закономерности. Содержания микроэлементов в эпифитоне, отобранном в Бабнинском, Перетрусовском, Новосельском, Омутнинском заливах, а также в Шошинском плесе, очень близки между собой и к средним значениям. Максимальные содержания микроэлементов в эпифитоне получены для Мошковического залива – приемника сточных вод Конаковской ГРЭС и коммунально-бытовых вод г. Конаково. Здесь эпифитон характеризуется высокими концентрациями Ba, Cd, Cu, Mg, Mn, Ni, Pb, S, Sr, Zn, превышающими фоновые значения в 3–8 раз.

Сравнение данных 2005 и 2010 гг. показало, что в 2005 г. эпифитон накапливал тяжелые металлы (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) в концентрациях, превышающих концентрации в 2010 г. в 3–160 раз. Для биогенных элементов (P и S) также получены более высокие концентрации в 2005 г. Одинаковые концентрации получены для Al, As, Se, K, La, Li, Mg, Na, Ti, V. В 2010 г. получены более высокие, чем в 2005 г., концентрации Ca (в 14 раз) и Sr (в 2 раза), что, по-видимому, связано с пространственно-временной изменчивостью гидрохимических показателей и с изменениями видового состава альгофлоры. Снижение содержания тяжелых металлов в эпифитоне в исследуемый период – скорее всего, следствие снижения объемов сброса загрязняющих веществ в Иваньковское водохранилище. По данным [3], объем сброса сточных вод составлял, млн м³: в 2007 г. – 101.9, в 2008 г. – 98.85, в 2009 г. – 92.31, в 2010 г. – 92.3. В [19] показано, что наблюдается тенденция уменьшения загрязнения тяжелыми металлами во всех группах аквальных комплексов верхневолжских водохранилищ за последние 10 лет (до 2011 г.), что хорошо коррелирует со снижением антропогенного пресса сточных вод на водоемы. В 2005 г., по данным автора статьи, концентрации тяжелых металлов в воде исследуемых заливов значительно превышали концентрации, полученные в 2010 г. для исследуемых заливов (таблица) и составляли для Cd – 0.3, для Co – 1, для Cr – 55, для Cu – 14, для Ni – 7, для Zn – 108 мкг/л. Интересно, что средние содержания микроэлементов в ВВР и в 2005 г., и в 2010 г. были одинаковыми. Это объясняется тем, что высшие водные растения более устойчивы к загрязнению биологические виды, а также – особенностями их питания. Макрофиты поглощают микроэлементы как из воды, так и из загрязненных донных отложений, в то время как эпифитон аккумулирует элементы только из воды.

Сравнение результатов исследования содержания микроэлементов в макрофитах и эпифитоне погруженных видов растительности показало, что большинство микроэлементов в большей степени накапливается в эпифитоне по сравнению с макрофитами (Ag, Ca, Ba, Cd, Co, Se, Cu, Fe, Mn, Pb,

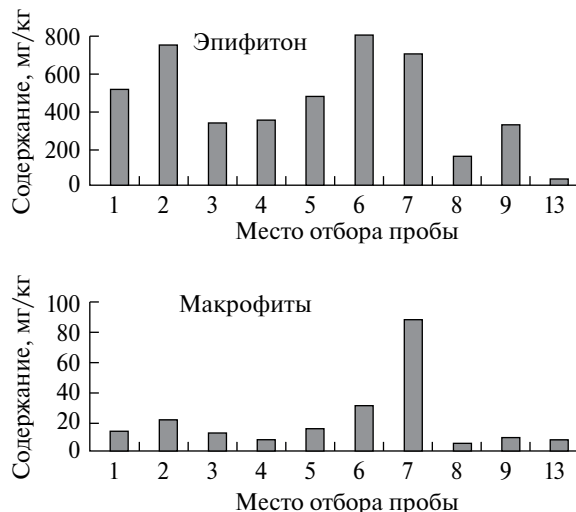


Рис. 2. Распределение цинка в образцах эпифитона и макрофитов (на примере образцов 2005 г.). Места отбора проб: 1 – Мошковический (манник водяной), 2 – Мошковический (водяной орех), 3 – Бабнинский (рдест плавающий), 4 – Бабнинский (кубышка желтая), 5 – Бабнинский (камыш озерный), 6 – Бабнинский (тростник обыкновенный), 7 – Омутнинский (роголистник темно-зеленый), 8 – Омутнинский (рогоз узколистный), 9 – Перетрусовский (манник водяной) заливы, 10 – Шошинский плес (манник водяной).

La, Li, Sr, V, Zn, Y, Yb). Равные содержания получены для Al, As, Co, Mg, Mo, Nd, Ni, Sc. Макрофиты содержат большие количества K, Na, P, S, Ti по сравнению с эпифитоном. Рассчитанные коэффициенты биологического поглощения для макрофитов подтверждают данную закономерность и свидетельствуют о том, что для большинства микроэлементов эпифитон – более эффективный групповой концентратор по сравнению с макрофитами. Пространственное распределение микроэлементов в эпифитонзвеси повторяет их распределение в макрофитах и имеет сходный характер (рис. 2). Например, и макрофиты, и эпифитон имеют максимальные содержания большинства микроэлементов в Омутнинском заливе, в воде и донных отложениях которого практически всегда отмечаются высокие концентрации микроэлементов. Омутнинское заостровное мелководье характеризуется повышенной мутностью воды, специфическими застойными гидродинамическими условиями; грунт представлен макрофитным илом, богатым органическим веществом. В других исследованных заливах, где макрофиты содержат микроэлементы на уровне фоновых концентраций, содержание элементов в эпифитоне также характеризуется средними значениями. Однако имеются и различия в пространственном распределении. Это связано с тем, что макрофиты накапливают загрязняющие вещества в течение длительного периода вегетации и получают их как из воды, так

и из донных отложений, а микроэлементный состав эпифитона формируется под влиянием только поверхностных вод. Кроме того, биомасса эпифитных обрастаний, в отличие от макрофитов, возобновляется несколько раз за вегетационный период, т.е. отражает химический состав среды обитания за короткий период его жизненного цикла. Например, в месте сброса сточных вод Конаковской ГРЭС и коммунально-бытовых сточных вод г. Конаково, в Мошковическом заливе, для ВВР характерны средние содержания микроэлементов Zn, Pb, Cu, Ni, а в образцах эпифитона эти элементы содержатся в высоких концентрациях, что свидетельствует о “залповом” загрязнении водной среды в этом месте. Таким образом, геохимический состав эпифитона – хороший индикатор загрязнения водной среды, где он обитает в короткий временной период, и может использоваться для выявления современного антропогенного воздействия на водную экосистему.

В качестве основных биоиндикаторных показателей загрязнения водных экосистем при оценке загрязнения среды металлами с помощью гидробионтов принято использовать коэффициенты биологического поглощения металлов в гидробионте – отношение их содержания в гидробионте к содержанию в среде и коэффициенты концентрации металлов в гидробионтах загрязненных территорий относительно их содержания на фоновых участках [10, 16].

Для оценки концентрационной биогеохимической функции эпифитона и степени накопления в нем химических элементов рассчитаны коэффициенты биологического поглощения (КБП) – отношение концентрации элемента в сухой массе эпифитона к его концентрации в воде [2, 12, 16]: $KBP = C_{i \text{ эп}} / C_{i \text{ вода}}$ ($C_{i \text{ эп}}$ – содержание i -го химического элемента в эпифитоне, мг/кг сухой массы; $C_{i \text{ вода}}$ – содержание в воде, мг/л). Как известно, КБП характеризует физиологическую потребность живых организмов в химических элементах и способность живых организмов накапливать элементы из окружающей водной среды. Средние значения коэффициентов биологического поглощения, полученные для эпифитона фоновых заливов Иваньковского водохранилища, приведены в таблице. Коэффициенты биологического поглощения, рассчитанные для эпифитона для большинства элементов, значительно превышали соответствующие значения для макрофитов.

По значениям КБП в эпифитоне элементы делятся на две группы:

1. $KBP = n \times 10^1 - 10^2$ – Sr, Ca As S, Ag, K, Mg, Mo, Na – элементы, которые сравнительно слабо накапливаются в эпифитоне;

2. $KBP = n \times 10^3 - 10^5$ – Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Nd, Ni, P, Pb, V, Zn, W, Al, Ce, La, Sc, Ti, Y, Yb – элементы, в значительной степени, накапливающиеся в эпифитоне из природных вод.

Для места сброса сточных вод в Мошковическом заливе величины КБП в несколько раз превосходили средние: для Ba – в 4, для Cd – в 17, для Cu – в 40, для Ni – в 31, для Pb – в 24–166, для Zn – в 81 раз. В Омутнинском заливе коэффициенты биологического поглощения также оказались значительно выше средних значений: для Ba – в 4, для Co – в 29, для Cr – в 56, для Cu – в 65 раз. Колебания величин КБП указывают на различие степени антропогенной нагрузки на разных участках водохранилища, а также свидетельствуют о хорошо выраженной способности эпифитона к биоаккумуляции большого количества микроэлементов и о его биоиндикаторной значимости.

При интерпретации аналитических данных для выявления геохимической специфики биологических объектов часто применяется нормирование элементного состава исследуемого объекта по Sc как элементу инертному в гипергенных процессах [2, 12, 14]. Эффективность концентрирования химических элементов в образце относительно кларков глинистых сланцев (shale) оценивают с помощью коэффициентов обогащения (EF): $EF = (C_{Xi} / C_{XSc})_{\text{обр}} / (C_{Xi} / C_{XSc})_{\text{shale}}$ (содержания: $C_{Xi \text{ обр}}$ – химического элемента в объекте исследования, $C_{XSc \text{ обр}}$ – скандия в объекте исследования, $C_{Xi \text{ shale}}$ – химического элемента в глинистом сланце (shale) [22], $C_{XSc \text{ shale}}$ – скандия в сланце).

По значениям коэффициентов обогащения элементы делятся на группы:

$EF \leq 2$ – Al, Ce, Co, Cr, Fe, Mo, Nd, S, Sc, Ti, V, Yb, Ni, Y – слабо накапливаются в эпифитоне;

EF в диапазоне 2–10 – As, Cu, K, Pb, Zn Ce La Li Na – сравнительно хорошо накапливаются в эпифитоне по сравнению со сланцами;

$EF > 10$ – Ag, Ba, Ca, Cd, Mn, P Mg, Sr – в значительной степени накапливаются в эпифитоне относительно кларков глинистых сланцев. Таким образом, концентрационная функция эпифитона способствует обогащению донных отложений биогенными макроэлементами, щелочными и щелочноземельными элементами и другими биогенными металлами в большей степени, чем кларки глинистых сланцев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определен геохимический состав эпифитона макрофитов Иваньковского водохранилища. Элементный состав эпифитона погруженных видов макрофитов близок к среднему составу пресноводного планктона и соответствует

незагрязненным водным экосистемам. Большинство заливов Иваньковского водохранилища характеризуются фоновыми содержаниями микроэлементов в эпифитоне. Исключение составляют заливы Мошковический, находящийся под влиянием сточных вод, и Омутнинский, где высокие содержания микроэлементов в эпифитоне обусловлены природными факторами. Пробоотбор эпифитона рекомендуется проводить с погруженных видов макрофитов, так как гидродинамические условия произрастания макрофитов этой группы позволяют избежать попадания в образец большого количества терригенной взвеси. Макрофиты водно-болотной экологической группы задерживают загрязняющие вещества, поступающие с поверхностным стоком, на них осаждаются взвесь из взмученных донных осадков, поэтому состав эпифитовзвеси с растений этой группы характеризует перенос микроэлементов в составе твердого речного стока.

Эпифитон удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к организмам, используемым в целях биоиндикации, а также имеет ряд преимуществ перед другим организмами. Исследование микроэлементного состава эпифитона позволяет решать проблему оперативной оценки современного состояния водных экосистем, характеризует степень, состав и характер антропогенной нагрузки на водную экосистему. Об уровне загрязнения водной среды можно судить по степени аккумуляции поллютанта в эпифитоне, и можно использовать эти данные для мониторинга и ретроспективного анализа изменения экологического состояния Иваньковского водохранилища. Повсеместная распространенность эпифитона, прикрепленность к определенному месту обитания, относительно простая процедура пробоотбора и пробоподготовки позволяют рекомендовать применение эпифитона в качестве объекта биомониторинга и биоиндикации антропогенного влияния на водоем. Для выявления “залпового” загрязнения водной среды эпифитон – более информативный объект исследования по сравнению с высшей водной растительностью.

По величине КБП определены химические элементы из окружающей водной среды, которые в значительной степени накапливаются эпифитонном. Концентрационная функция эпифитона приводит к обогащению донных осадков биогенными элементами, в особенности щелочными и щелочноземельными, и рядом микроэлементов (Ag, Cd, Mn, Sr, As, Cu, Pb, Zn, Ce, La).

Авторы выражают благодарность О.А. Тютюнник (ГЕОХИ РАН) за помощь при проведении АЭС-ИСП анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляева П.Г.* Состав и структура фитоперифитона реки Сылва (Пермский край) // Ботан. журн. 2014. Т. 99. № 8. С. 903–916.
2. Биогеохимия океана / Под ред. Мониной А.С., Лисицына А.П. М.: Наука, 1983. 368 с.
3. Государственный доклад Минприроды России “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2011 году”. <http://www.mnr.gov.ru/> (дата обращения 02.02.2016). С. 103.
4. *Гришанцева Е.С., Сафронова Н.С.* Эколого-геохимическая оценка состояния Волжского источника водоснабжения г. Москвы // Вод. ресурсы. 2012. Т. 39. № 3. С. 304–322.
5. *Гришанцева Е.С., Сафронова Н.С., Кирпичникова Н.В., Федорова Л.П.* Закономерности распределения микроэлементов в высшей водной растительности Иваньковского водохранилища // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2010. № 3. С. 223–231.
6. *Жукова А.А.* Первичная продукция планктона, эпифитона, макрофитов и микрофитобентоса в литоральных биотопах оз. Нарочь // Вестн. БрГУ. 2005. № 3 (24). С. 79–84.
7. *Казмирук В.Д., Казмирук Т.Н., Бреховских В.Ф.* Зарастающие водотоки и водоемы: Динамические процессы формирования донных отложений. М.: Наука, 2004, 310 с.
8. *Косятова В.А., Левшина Н.А., Эйнон Л.О.* Эпифитон макрофитов – эдификаторов Иваньковского водохранилища и его влияние на формирование качества природной воды // Вод. ресурсы. 1990. № 3. С. 81–88.
9. *Косятова В.А., Эйнон Л.О.* Эпифитон пресноводных водоемов и его роль в формировании качества воды // Вод. ресурсы. 1992. № 5. С. 110–120.
10. *Куриленко В.В., Осмоловская Н.Г.* Биоиндикаторная роль высших растений при диагностике загрязнений водных экосистем на примере малых водоемов г. Санкт-Петербурга // Вод. ресурсы. 2007. Т. 34. № 6. С. 757–764.
11. *Леонова Г.А.* Биогеохимическая индикация загрязнения водных экосистем тяжелыми металлами // Вод. ресурсы. 2004. Т. 31. № 2. С. 215–222.
12. *Леонова Г.А., Бобров В.А.* Геохимическая роль планктона континентальных водоемов Сибири в концентрировании и биоседиментации микроэлементов. Новосибирск: ГЕО, 2012. 314 с.
13. *Леонова Г.А., Бобров В.А., Лазарева Е.В., Богуш А.А., Кривоногов С.К.* Биогенный вклад микроэлементов в органическое вещество современных озерных сапропелей (на примере оз. Кирек) // Литология и полезные ископаемые. 2011. № 2. С. 115–131.
14. *Лисицын А.П.* Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы “живого океана”

- на” // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 1. С. 15–48.
15. Макаревич Т.А., Михеева Т.М., Лукьянова Е.В. Макрофиты как субстрат для перифитона // Вестн. БГУ. 1986. Сер. 2. № 3. С. 30–33.
16. Основы экологии, биоиндикации и биотестирования водных экосистем / Под ред. Куриленко В.В. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. 448 с.
17. Сафронова Н.С., Гришанцева Е.С., Коробейник Г.С. Углеродные газы (C_1 - C_3) и органическое вещество донных осадков Ивановского водохранилища р. Волги // Вод. ресурсы 2013 Т. 40 № 3. С. 274–286.
18. Тарасенко Л.В., Луценко М.А. Фитоценозы мелководий Ивановского водохранилища // Биологическая продуктивность и качество воды Волги и ее водохранилищ. М.: Наука, 1984. С. 161–162.
19. Тихомиров О.А. Формирование, динамика и экологическое состояние аквальных комплексов равнинных водохранилищ. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: МГПУ, 2011. 44 с.
20. Янин Е.П. Эпифитовзвесь – новый индикатор загрязнения речных систем тяжелыми металлами. М.: ИМГРЭ, 2002. 51 с.
21. Cattaneo A., Galanti G., Gentinetta S., Romo S. Epiphytic algae and macroinvertebrates on submerged and floating-leaved macrophytes in an Italian lake // Freshwater Biol. 1998. V. 39. № 4. P. 725–740.
22. Li Yuan-hui. Distribution patterns of the elements in the ocean: A synthesis // Geochim. Cosmochim. Acta. 1991. V. 55. P. 3223–3240.
23. Piirsoo K., Vilbaste S., Truu J. et al. Origin of phytoplankton and the environmental factors governing the structure of microalgal communities in lowland streams // Aquatic Ecol. 2007. V. 41. № 2. P. 183–194.
24. Pip E., Robinson G.G.C. A comparison of algal periphyton composition on eleven species of submerged macrophytes // Hydrobiol. Bull. 1985. V. 18. № 2. P. 109–118.