

УДК 551.465.7

Особенности накопления тяжелых металлов в воде, донных отложениях и биоте залива Черкалов сор оз. Байкал

З. И. ХАЖЕЕВА¹, Н. М. ПРОНИН², Л. Д. РАДНАЕВА¹, Ж. Н. ДУГАРОВ², С. Д. УРБАЗАЕВА¹¹Байкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ 670046 (Россия)

zkhazh@binm.bsc.buryatia.ru

²Институт общей и экспериментальной биологии Сибирского отделения РАН, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ 670046 (Россия)

(Поступила 15.03.04; после доработки 24.03.04)

Аннотация

Показана сезонная динамика содержания тяжелых металлов (Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Ni, Co, Cd, Pb) в воде, донных отложениях, проанализировано их содержание в высшей водной растительности (*Elodea canadensis*) и зообентосе (*mollusca bivalvia*) залива Черкалов сор оз. Байкал. Установлено, что превышение ПДК рыбохозяйственного водоема для Fe, Mn, Zn, Cu наблюдается в воде в течение года, для Pb – в период весеннего половодья. Содержание всех металлов в донных отложениях во фракциях <60 мкм на 20–50 % превышает фоновые значения, накопления Cd – почти в 3 раза. Показано, что на перераспределение Mn, Zn, Cu, Cd существенное влияние оказывают водные растения и моллюски.

ВВЕДЕНИЕ

Значительная роль мелководных заливов в формировании качества вод, поступающих в озеро, и экологического состояния водоема вызывает необходимость изучения их загрязнения. Один из наиболее объективных и надежных показателей загрязнения водоема и общей антропогенной нагрузки на него – содержание тяжелых металлов (ТМ) в воде, донных отложениях (ДО) и биоте. В отличие от органических веществ ТМ не подвержены деградации и могут лишь мигрировать и накапливаться в различных компонентах природной экосистемы. Накопление ТМ в ДО до значений, превышающих допустимые нормы и фоновые, представляет опасность для качества вод из-за возможного вторичного загрязнения – выноса микроэлементов из ДО в воду [1–3]. Высокие содержания ТМ в ДО неблагоприятно отражаются на биологических компонентах [4–6]. Поскольку гидробионты активно аккумулируют из воды химические соединения, в частности соединения ТМ,

информация о содержании последних в природных водах важна для понимания влияния соединений металлов на водные организмы. Реальная картина качества воды и экологического состояния природного водоема и водотока должна включать в себя комплексную оценку содержания различных химических веществ в компонентах экосистемы водоема.

Цель работы – определить содержание тяжелых металлов в экосистеме залива Черкалов сор (Истоминский сор) и выявить характер их накопления в цепи вода – растения – зообентос – ДО.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Залив Черкалов сор представляет собой водоем прибрежной зоны, который отделен от оз. Байкал узкой песчаной косой, расчлененной несколькими “прорвами” (рис. 1). Наибольшая глубина водоема 2.5 м, преобладающая – 2.0 м, площадь поверхности 14 км². Подъем уровня оз. Байкал в результате строительства Иркутской ГЭС привел к значительному пе-

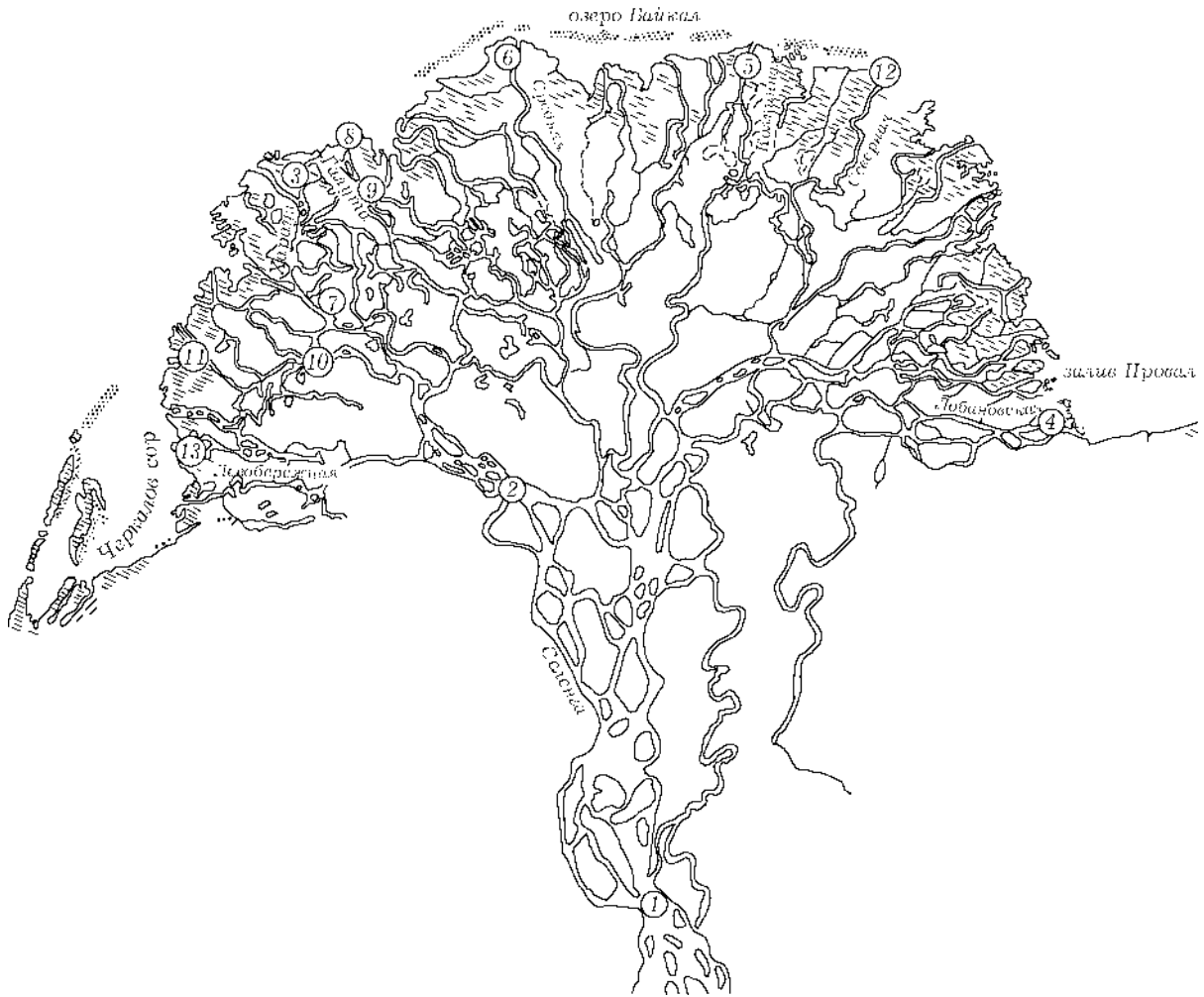


Рис. 1. Карта-схема залива Черкалов сор оз. Байкал: 1 – р. Селенга, с. Кабанск, 2 – р. Селенга, пос. Мурзино, 3 – протока р. Харауз, устье, 4 – пр. Лобановская, устье, 5 – пр. Колчинная, устье, 6 – пр. Средняя, устье, 7 – оз. Заверняиха, 8 – пр. Галута, устье, 9 – пр. Галута, 10 – р. Селенга, о. Семеновский, 11 – пр. Шаманка, устье, 12 – пр. Северная, устье, 13 – пр. Левобережная, устье.

реформированию песчаных островов и кос, отделявших залив от озера. В результате изменились гидродинамический режим, условия осаднения наносов; из естественного развития выключились почвенно-растительные экосистемы. Затопление низких камышовых островов в прибрежной зоне привело к гниению водной растительности, свалок – к мобилизации ТМ и других компонентов из затопленных почв в водную массу. В то же время Черкалов сор интенсивно используется для рыболовства и проведения рыбоводных мероприятий.

Образцы проб воды отбирали с помощью батометра, консервировали добавлением концентрированной азотной кислоты квалификации «ос. ч.» из расчета 4 мл кислоты на 1 л рас-

твора и фильтровали через фильтр “синяя лента”. Образцы донных осадков отбирали с помощью дночерпателя Петерсона и помещали в двойные полиэтиленовые пакеты для исключения потерь летучих элементов и сверхтонких фракций. Образцы высших водных растений (*Elodea canadensis*) и беззубки (*mollusca bivalvia*) отбирали для анализа в июле. После отбора моллюсков замораживали и доставляли в лабораторию, где препарировали инструментами из оргстекла. Из нескольких особей (от 25 до 40 экз.) составляли отдельно сборные пробы мышечной ткани и внутренних органов (печень, кишечник, селезенка, почки). Предварительно счищали перифитоны раковин для анализа. Затем образцы отмывали, помещали на 1 мин в кипящую

ТАБЛИЦА 1

Некоторые средние химические показатели ($M \pm \delta$) поверхностных вод и донных отложений залива Черкалов сор

Макроэлементы		Биогенные элементы		Микроэлементы		
Показатель	Содержание, мг/л	Показатель	Содержание, мг/л	Элемент	Вода, мкг/л	Донные отложения, мг/кг
Na	5.9 ± 0.3	NO ₃ ⁻	0.07	Cu	15.2	16.9
K	1.3 ± 0.2	NH ₄ ⁺	0.02	Zn	35.3	55.6
Ca	20.6 ± 0.6	NO ₂ ⁻	0.002	Mn	40.1	902.0
Mg	5.3 ± 0.2	PO ₄ ³⁻	0.02	Cd	0.3	0.8
HCO ₃ ⁻	99.8 ± 1.5	БО	18	Co	0.5	14.2
SO ₄ ²⁻	8.6 ± 1.1	ПО	4.8	Ni	9.0	35.1
СГ	1.5 ± 0.5			Cr	2.0	134.7
pH	7.7 ± 0.4			Pb	8.1	16.0

дистиллированную воду, после чего раковины отделяли от тела моллюсков. Сырые пробы тел моллюсков взвешивали, фиксировали этиловым спиртом и через 6–12 ч упаривали и высушивали при $T = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ до сухого состояния; далее сжигали мокрым озолением по методу Кьельдаля в азотной кислоте (квалификации «ос. ч.») в течение 12–18 ч, а в отдельных случаях – до 24 ч (до полного обесцвечивания сжигаемой массы).

Валовое содержание тяжелых металлов (Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Ni, Co, Cd, Pb) определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии с пламенной атомизацией на спектрофотометрах фирмы SOLAAR. Для атомизации в пламени использовалась смесь ацетилен – воздух. Анализы проводили троекратно. В качестве эталонов использовали государственные стандарты (для эмиссионного анализа микроэлементов в биологических объектах СВМТ-02 № 3170–85). Коэффициенты накопления ТМ относительно ДО рассчитывали по уравнению: $K = C_x / C_0$, где C_x и C_0 – концентрации элемента в золе сравниваемого объекта и в ДО соответственно, мг/кг. Для расчета коэффициента накопления ТМ относительно воды использовали соотношение содержания металла в теле гидробионтов (мг/кг сырой массы) и в воде (мг/л).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Черкалов сор является местом сопряжения авандельты р. Селенги с прибрежными течениями из южного Байкала. Исследования

показали, что в летний период воды р. Селенги, поступая в Байкал, распространяются, как более теплые, по поверхности озера, постепенно смешиваясь с байкальскими. Мощность смешанных вод в 3–7 км от селенгинских проток не превышает 10–15 м. В отдельных случаях под влиянием ветров примесь речных вод обнаруживается на глубинах до 50 м [7]. Однако во время весеннего термобара возникающие плотностные потоки доставляют теплые и более минерализованные селенгинские воды и на большие глубины – до 1000–1200 м. Летом в заливе наблюдается интенсивное цветение цианобактерий, вода характеризуется высокими значениями pH (7.7 ± 0.4) (табл. 1).

Изучение химического состава воды р. Селенги показало, что содержание сульфатов в воде в среднем составляет 8.4 мг/л, тогда как в 1950-е годы оно составляло 6.5 мг/л, а в 1970-е – 12.4 мг/л [8]. В составе селенгинской воды выросла доля сульфатов и одновалентных катионов, снизилась – гидрокарбонатов и кальция. Вынос сульфатов с водами реки в Байкал в сравнении с 1950-ми годами увеличился примерно на 25 % [9]. Сравнение данных, приведенных в табл. 1, с данными [8], показывает, что поверхностные воды залива Черкалов сор близки по составу к селенгинским водам. Очевидно, что за последние 40 лет под влиянием антропогенных факторов природный химический состав селенгинских вод и соотношение макрокомпонентов претерпели заметные изменения.

На рис. 2, 3 приведены результаты изучения сезонной динамики содержания хими-

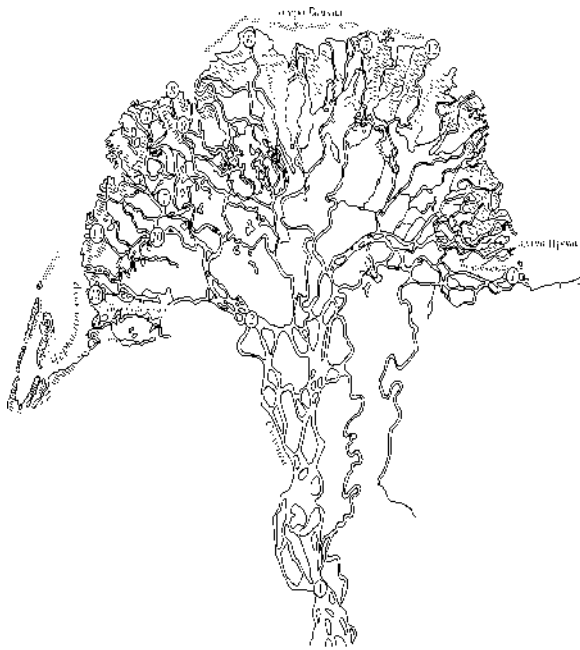


Рис. 2. Сезонная динамика содержаний Zn, Mn, Cu, Pb в заливе Черкалов сор оз. Байкал: а – в воде, б – в донных отложениях.

ческих элементов в воде залива Черкалов сор (на примере данных 2002 г.). Полученные данные сопоставляли со значениями ПДК для рыбохозяйственных водоемов [10], мкг/л: Fe 50, Mn 10, Zn 10, Cu 1, Pb 6. Максимальное содержание Mn, Zn, Cu в воде залива отмечается в зимний период и составляет 61, 67, 21 мкг/л соответственно, что превышает ПДК для рыбохозяйственных водоемов в 6,2, 6,3 и в 21 раз соответственно. В период открытой воды содержание этих элементов в воде снижается. Так, осенью содержание Mn в воде плавно уменьшается до 1,5 ПДК (см. рис. 2, а).

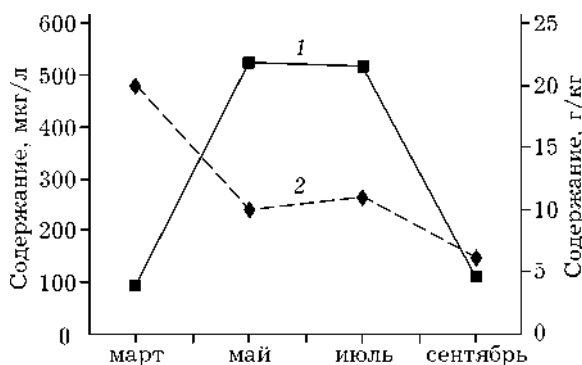


Рис. 3. Сезонная динамика содержаний Fe в заливе Черкалов сор оз. Байкал в воде (1) и донных отложениях (2).

В период весеннего половодья содержание Zn и Cu снижается в 4–8 раз, а в летний период вновь увеличиваются: до уровня значений зимнего периода для Cu и на 60 % для Zn. Осенью содержание этих металлов в воде сора снижается до значений ПДК для Zn и 3 ПДК для Cu. Максимальное содержание Pb (см. рис. 2, а) и Fe (см. рис. 3) в воде отмечается в период весеннего половодья и составляет 16 и 525 мкг/л соответственно, что превышает ПДК для рыбохозяйственных водных объектов [10] в 2,5 раза для Pb и 10,3 – для Fe. В осенний период содержание Fe в воде падает до значений 2 ПДК (см. рис. 3). Содержание Pb в воде залива Черкалов сор уменьшается до ПДК в летне-осенний периоды. Сезонная динамика содержания Co аналогична изменениям Zn, Cu, Mn и не превышает ПДК. Что касается Cd, то его содержание в воде не превышает 0,5 мкг/л, а осенью оно понижается до 0,003 мкг/л.

Полученные данные свидетельствуют о том, что сезонная динамика колебаний содержаний Zn и Cu в воде характеризуется снижением при увеличении расходов воды в период весеннего половодья, в то время как содержания Fe и Pb в этот период значительно увеличиваются. Минимальное содержание всех элементов в воде отмечается в период осенней межени.

В работе рассматриваются валовые концентрации ТМ, хотя токсическим эффектом обладают только их ионные формы. Все изученные ТМ характеризуются способностью к комплексообразованию (<50 %). Кроме того, в ходе сезонной динамики экосистемы и многолетних трендов физико-химические условия могут изменяться, и связанные металлы могут переходить в раствор [11]. Несмотря на обнаруженные потенциально опасные содержания перечисленных выше элементов в воде полученные данные позволяют предположить, что они в основном отражают лишь кратковременные загрязнения природных вод и не являются индикаторами присутствия ТМ в макрофитах, животных с длительным жизненным циклом.

Гранулометрический анализ ДО залива Черкалов сор показал, что относительное содержание фракций размером частиц от 0,05 мм и менее составляет 68 %. Доля алев-

ТАБЛИЦА 2

Содержание тяжелых металлов в различных гранулометрических фракциях донных отложений залива Черкалов сор, мг/кг

Размеры фракций, мм	Fe	Mn	Zn	Cu	Pb	Ni	Co	Cr	Cd
2R = 0.05 (ил)	31 000	1010	102	44.7	19.4	41.4	25.6	180	0.87
0.05 < 2R = 0.1	18 000	900	55.5	16.9	16.8	35.5	18.9	135	0.56
2R > 0.1	7360	470	41.5	13.5	12.3	21.4	16.7	87.8	0.29
Фоновое содержание [12] (ил)	27 000	900	340	30.0	21.0	50.1	20.0	902	0.27

ритовой фракции с размером частиц 0.01–0.1 мм составляет 25–30 %, более грубых частиц (>0.1 мм) псаммитовой фракции не превышает 12 %. На рис. 2, б и 3 приведена сезонная зависимость динамики накопления ТМ во фракциях размером ≤0.1 мм. Максимальные накопления рассматриваемых элементов (за исключением Zn и Cu) в ДО отмечены в зимний период, а в период открытой воды фиксируется снижение накопления этих элементов (на 50–60 % от значений зимнего периода). Так, максимальное накопление ТМ в зимний период составляет: Fe – 17.9 г/кг, Pb – 16.8 мг/кг, Mn – 902.4 мг/кг. В отличие от них максимальные накопления Zn и Cu наблюдаются в летний период и составляют 55.5 и 16.8 мг/кг соответственно. Осенью накопления этих элементов в ДО уменьшаются в среднем в 4 раза. В подледный период накопления Zn и Cu не превышают 50 и 40 % значений от летнего периода соответственно.

Поступление микроэлементов из воды в ДО во многом определяется наличием фракции частиц размером <0.05 мм. Данные о загрязнении ДО залива свидетельствуют о том, что с уменьшением размера частиц содержание практически всех металлов возрастает (табл. 2). Сопоставление наблюдаемых значений с фоновыми содержаниями [11] этой фракции показывает, что содержание Fe, Mn, Co возросло в 1.1–1.3 раза, Cu – в 1.5, Cr – в 1.9, Cd – в 3.2 раза. Частицы мелких фракций (<0.05 мм) хорошо адсорбируют Fe, Mn, Cr, Ni, Pb, Cu, Cd, следовательно, частицы пелитовой фракции – главный сорбирующий и коагулирующий материал для ТМ. Таким образом, наблюдается общая тенденция увеличения числа металлов, содержания которых превышают фоновые для данной геохимической провинции. Фракции размером ≥0.1 мм

представлены песчаным материалом, характеризуются минимальным содержанием исследованных металлов и практически не участвуют в процессах самоочищения водной среды. Для Cu и Cd велика вероятность вторичного поступления из ДО, что вызвано изменением физико-химических и гидродинамических условий водной среды и ограничено по площади зонами активного илонакопления.

Для гидробиологического анализа качества вод могут быть использованы практически все группы организмов, населяющих водоемы. Высшие водные растения также способны поглощать и накапливать вещества различной химической природы и, следовательно, служить объектами для изучения загрязнения ТМ.

В табл. 3 приведены данные о содержании тяжелых металлов в золе исследованных гидробионтов. Величины содержания ТМ характеризуются положительной корреляционной связью между собой (0.44–0.95, $P < 0.05$), что косвенно свидетельствует о едином, т. е. техногенном, поступлении большей части ТМ в окружающую среду. Как известно, главную массу золы растений составляют те элементы, которые в данных природных условиях образуют в большом количестве легко подвижные соединения и обеспечивают жизненные функции, характерные для данных гидробионтов.

Содержание ТМ в элодее канадской текущего года изменяется в следующем порядке: Mn>Zn>Cr>Cu>Pb>Ni>Co>Cd. В золе прошлогодних растений аналогичный ряд имеет иной вид: Mn>Cr>Zn>Cu>Pb>Ni>Co>Cd. Видно, что наибольшее содержание в высших водных растениях обнаруживают Mn, Zn, Cr, минимальные значения характерны для Co, Cd.

Как видно из данных табл. 3, содержание Mn в золе прошлогодних растений в 2–2.2 раза

ТАБЛИЦА 3

Содержание тяжелых металлов в золе элодеи канадской и двустворчатых моллюсков, мг/кг

Компонент	Cu	Zn	Mn	Cd	Co	Ni	Cr	Pb
Элодея, 2002 г.	159	464	34 700	0.7	15.2	26.8	204	512
То же, 2001 г.	63.2	84.1	88 500	1.6	7.8	9.5	139	251
Мышцы моллюсков	220	1900	7500	21.1	16.1	25.2	45.2	351
Внутренние органы моллюсков	100	920	13 200	6.2	5.3	8.3	26.1	157
Перифитоны моллюсков	38.0	88.9	1160	0.9	17.5	28.1	105	172

выше по сравнению со свежесобранными растениями. Примерно такая же картина наблюдается и в распределении Cd. Попытка объяснить увеличение содержания металлов в прошлогодних растениях уменьшением зольности (за счет вымывания подвижных химических элементов K, Na, Ca, P) не удалась, так как зольность свежих и перезимовавших растений примерно одинакова.

В тканях моллюсков также наблюдается неодинаковое распределение металлов: наибольшее содержание большинства металлов отмечается в мышцах (см. табл. 3). Среднее содержание всех исследованных элементов в мышцах почти в 2.0–2.5 раза больше, чем во внутренних органах. В отличие от других элементов содержание Mn во внутренних органах в 1.8 раза больше, чем в мышцах. В целом содержание ТМ в мышцах и внутренних органах моллюсков изменяется в следующем порядке: Mn>Zn>Cu>Cr>Pb>Ni>Cd>Co. Для перифитонов моллюсков аналогичный ряд имеет несколько иной вид: Mn>Cr>Zn>Cu>Ni>

Co>Pb>Cd. Видно, что наибольшее содержание во внутренних тканях моллюсков характерно для Mn и Zn, в перифитонах – для Mn и Cr.

Коэффициенты накопления *K* обычно выше в водоемах с относительно низким содержанием ТМ в окружающей среде [12]. Среди исследованных ТМ в элодее канадской максимально высокими значениями коэффициента накопления *K* по отношению к воде отличаются Mn, Cr, Co, минимальными – Cd, Ni (табл. 4). Коэффициенты накопления *K* исследуемых ТМ, полученные по соотношению с содержанием ТМ в воде, располагаются в следующем порядке: Mn>Cr>Co>Zn>Cu>Pb>Ni>Cd. По соотношению с содержанием ТМ в ДО этот ряд отличен: Mn>Cu>Zn>Pb>Cr>Cd = Co>Ni (табл. 5). Содержание ТМ в элодее канадской в целом характеризуется положительной корреляционной связью с содержанием ТМ в воде и донных отложениях.

Коэффициент накопления *K*, напротив, не столь однозначно зависит от содержания соответствующих ТМ в воде. Наблюдается более тесная зависимость коэффициентов накопления по содержанию в ДО от содержания ТМ в донных отложениях.

Таким образом, коэффициенты накопления в элодее канадской, рассчитанные по содержанию соединения металлов в ДО, более показательны, чем коэффициенты накопления, полученные при сравнении с содержанием ТМ в воде.

В случае моллюсков по величине коэффициента накопления *K*, рассчитанной по соотношению с содержанием ТМ в воде (см. табл. 4), исследованные ТМ располагаются в следующем порядке: Mn>Cd>Zn>Co>Cr>Cu>Pb>Ni – мышцы, Mn>Zn>Cd>Cr>Co>Cu>Pb>Ni – внутренние органы. Аналогичный ряд, полученный по соотношению с содержанием в ДО (см. табл. 5), имеет следующий вид:

ТАБЛИЦА 4

Коэффициенты накопления тяжелых металлов в элодее канадской и моллюсках залива Черкалов сор по отношению к содержанию тяжелых металлов в воде

Элемент	Элодея		Моллюски	
	2002 г.	2001 г.	Мышцы	Внутренние органы
Cu	1300	520	630	290
Zn	1600	300	2300	1100
Mn	108 000	277 000	8100	14 400
Cd	300	670	3100	900
Co	3800	1800	1400	460
Ni	400	130	120	40
Cr	12 700	8700	980	570
Pb	800	390	190	85

ТАБЛИЦА 5

Коэффициенты накопления тяжелых металлов в элодее канадской и моллюсках залива Черкалов сор по отношению к их содержанию в донных отложениях

Элемент	Элодея		Моллюски		
	2002 г.	2001 г.	Мышцы	Внутренние органы	Перифитоны
Cu	9.4	3.7	13	5.9	2.2
Zn	8.3	1.5	34	16	1.6
Mn	38	98	8.3	14	1.3
Cd	0.8	2.0	26	7.7	1.1
Co	0.8	0.4	0.8	0.3	0.9
Ni	0.7	0.2	0.7	0.2	0.8
Cr	1.5	1.0	0.3	0.2	0.8
Pb	3.2	1.5	0.2	0.9	1.1

Zn>Cd>Cu>Mn>Co>Ni>Cr>Pb – мышцы, Zn>Mn>Cd>Cu>Pb>Co>Ni>Cr – внутренние органы, Cu>Zn>Mn>Cd = Pb>Co>Ni = Cr – перифитоны.

Из приведенных данных следует, что зависимость коэффициента накопления ТМ в моллюсках от содержания соответствующих ТМ в воде и ДО неоднозначна. Различие в рядах накопления ТМ, по-видимому, объясняется существованием видоспецифичности концентрирования и особенностью беззубки как фильтратора и обитателя илистых грунтов. (Следует отметить высокие коэффициенты накопления ряда металлов (Mn, Zn, Cu) моллюсками.)

Как известно, используя значения коэффициентов бионакопления K , рассчитанных по отношению к содержанию ТМ в донных отложениях, водные организмы можно подразделить на три следующие группы: макроконцентраторы ($K > 2$), микроконцентраторы ($1 < K < 2$) и деконцентраторы ($K < 1$) [12]. На основании наших данных можно считать, что высшее водное растение – элодея канадская – макроконцентратор по отношению к Mn, Zn, Cu, Pb и микроконцентратор по отношению к Cr. Беззубки относятся к макроконцентраторам по отношению к Mn, Zn, Cu, Cd и к деконцентраторам для Co, Ni, Cr, Pb.

Известно, что Mn представлен в иловых растворах преимущественно (75–95 %) не связанными в комплексные соединения ионами, что значительно увеличивает скорость его молекулярной диффузии [13] и усвояемость организмами. Для Zn же характерна высокая

степень связывания в комплексы с органическими веществами, что позволяет отнести его к группе менее подвижных элементов. Содержание этого металла в иловых растворах в 10–40 раз выше, чем в водной толще.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В поверхностных водах залива Черкалов сор наблюдается превышение ПДК для рыбохозяйственного водоема по Fe и Pb в период весеннего половодья в 10.1 и 2.5 раза соответственно, по Mn и Zn в 6.2–6.7 раза – в период зимней межени, по Cu – в течение года. Изучение содержания ТМ в различных гранулометрических фракциях ДО показало, что с уменьшением размера фракций содержание практически всех металлов возрастает. Сравнение имеющихся данных 2002 г. и 1983 г. по содержанию ТМ в ДО показывает, что загрязнение водоема возросло. Содержание всех металлов в донных отложениях фракции ≤ 60 мкм превышает фоновые значения на 20–50 %, а накопления Cd – почти в 3 раза [11]. Высшее водное растение (элодея канадская) оказывает существенное влияние на перераспределение Mn и, в меньшей степени, Zn и Cu. В растениях прошлого года наблюдается увеличение аккумуляции Mn и Cd. Большинство из изученных металлов накапливаются в мягких тканях моллюсков, однако Mn, Zn, Cu, Cd имеют довольно высокие коэффициенты накопления ($K > 2$).

Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного проекта СО РАН № 99.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Дж. В. Мур, С. Рамамурти, Тяжелые металлы в природных водах, Мир, Москва, 1987.
- 2 М. В. Гапеева, В. В. Законов, А. А. Гапеев, *Вод. ресурсы*, 24, 2 (1997) 174.
- 3 Е. П. Нахшина, *Гидробиол. журн.*, 21, 2 (1985) 80.
- 4 В. Ф. Бреховских, З. В. Волкова, Н. В. Кирпичникова и др., *Вод. ресурсы*, 28, 4 (2001) 441.
- 5 В. Ф. Бреховских, З. В. Волкова, Н. С. Золотарева, Там же, 24, 3 (1997) 344.
- 6 В. А. Яковлев, Там же, 27, 4 (2000) 237.
- 7 К. К. Вотинцев, И. В. Глазунов, А. П. Толмачева, *Гидрохимия рек бассейна озера Байкал*, Наука, Москва, 1965.
- 8 В. Н. Обожин, В. Т. Богданов, О. Ф. Кликунова, *Гидрохимия рек и озер Бурятии*, Наука, Новосибирск, 1984.
- 9 Л. М. Сороковицова, В. Н. Синюкович, Л. П. Голобокова, М. П. Чубаров, *Вод. ресурсы*, 27, 5 (2000) 560.
- 10 Перечень предельно допустимых концентраций и ориентировочно безопасных уровней воздействия вредных веществ для воды рыбохозяйственных водоемов, Мединор, Москва, 1995.
- 11 В. А. Ветров, А. И. Кузнецова, *Микроэлементы в природных средах региона озера Байкал*, Изд-во СО РАН, Новосибирск, 1997.
- 12 А. М. Никаноров, А. В. Жулидов, *Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах*, Гидрометеоиздат, Ленинград, 1991.
- 13 П. Н. Линник, Б. И. Набиванец, *Формы миграции металлов в природных водах*, Гидрометеоиздат, Ленинград, 1986.