

Правительство Вологодской области
ГОУ ВПО «Вологодский государственный педагогический университет»
Вологодская лаборатория ФГНУ «ГосНИОРХ»
Вологодское отделение гидробиологического общества РАН
НП «Научный центр экологических исследований»

**Водные и наземные экосистемы:
проблемы и перспективы исследований**

Материалы Всероссийской конференции с международным участием,
посвященной

70-летию кафедры зоологии и экологии ГОУ ВПО
«Вологодский государственный педагогический университет» и
35-летию Вологодской лаборатории – филиала ФГНУ «Государственный научно-
исследовательский институт озерного и речного рыбного хозяйства»

**ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ:
ТРОФИЧЕСКИЕ УРОВНИ И ПРОБЛЕМЫ
ПОДДЕРЖАНИЯ БИОРАЗНООБРАЗИЯ**

Proceedings of the Conference
**«Aquatic and overland ecosystems:
problems and perspectives of researches»**

**AQUATIC ECOSYSTEMS:
TROPIC LEVELS AND THE PROBLEMS
OF BIODIVERSITY CONSERVATION**

24–28 ноября 2008 г.
Вологда, Россия

К III 1395562

Вологда 2008

НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ТКАНЯХ И ОРГАНАХ РЫБ ОЗЕРА ВОЖЕ

М. Я. Борисов

Вологодская лаборатория ФГНУ «ГосНИОРХ», г. Вологда, gosniorch@vologda.ru

Рыбы, занимая верхнее трофическое звено в экосистеме, активно аккумулируют элементы. Интенсивность накопления элементов в организме рыб зависит не только от их концентрации в воде, но и от возраста рыб, типа питания, физиологического состояния особи. При исследовании особенностей накопления тяжелых металлов в тканях и органах рыб большее внимание уделяется водоемам с высокой токсикологической нагрузкой [1 – 4]. В тоже время, водоемы, в пределах водосборного бассейна которых нет крупных промышленных предприятий, также подвержены процессу токсификации [5]. Основным источником поступления токсикантов в такие водоемы служат атмосферные осадки. Это в свою очередь определяет особенности миграции токсических элементов, интенсивность и объемы их поступления, внутригодовую динамику концентрации в воде, пути поступления элементов в организм рыб. Примером водоема с низкой антропогенной нагрузкой на водосбор является озеро Воже, расположенное на севере Вологодской области.

Озеро Воже относится к мелководным крупным водоемам со средней глубиной 1,4 м, площадью зеркала 418 км² и объемом водной массы 0,6 км³. Качество воды в этом озере главным образом зависит от впадающих в него притоков. Ранее проведенные исследования свидетельствуют, что они являются и главным источником поступления в водоем притоков. При этом большая часть тяжелых

металлов привносится в период весеннего половодья, когда основным источником питания рек являются талые воды [6]. В связи с этим концентрации тяжелых металлов воде озера Воже подвержены значительным колебаниям при самых высоких значениях в период весеннего половодья и низких – зимней меженью. Высокое содержание в воде озера органических веществ способствует осаждению и накоплению тяжелых металлов в донных отложениях, о чем свидетельствуют значительно более высокие их концентрации в седиментах по сравнению с водой. Исследования, проведенные в начале 1990 годов, установили присутствие в мышечной ткани леща 10 тяжелых металлов [5]. В наибольших количествах в мышцах рыб озера Воже содержались железо, далее по убывающей следуют цинк, медь, свинец, марганец, кобальт, никель, хром, кадмий, ртуть и мышьяк. Рассчитанные по средней концентрации элементов в воде и мышечной ткани рыб коэффициенты биологического накопления установили высокую интенсивность накопления тяжелых металлов в мышечной ткани рыб. Так, коэффициент биологического накопления для ртути составил 1400, цинка – 687, мышьяка – 600, меди – 85, кадмия – 70, кобальта – 67, свинца – 56, железа – 44, никеля – 32, хрома – 11, марганца – 6.

Для понимания особенностей процесса миграции тяжелых металлов на уровне рыбного населения в 2004–2006 годах проведены исследования накопления тяжелых металлов в тканях и органах семи основных видов рыб. Отбор образцов мышц, печени, почек, жабр, гонад и сердца производился от свежешелойманной рыбы в период осенней траловой съемки и весенних контрольных уловов ставными сетями. Отобранная проба помещалась в герметичный полиэтиленовый пакет и замораживалась. Анализ концентрации металлов в органах и тканях рыб проводился в лаборатории токсикологии ФГНУ «ГосНИОРХ» (г. Санкт-Петербург). Органическую матрицу удаляли путем сжигания пробы в электропечи при контролируемой температуре. Результирующий раствор анализировался методом инверсионной вольтамперометрии с линейной разверткой потенциала на твердом электроде из стеклоуглерода в присутствии ионов двухвалентной ртути на приборе СБА-1БМ согласно аттестованным методикам [7, 8]. Всего исследовано 60 экземплярам семи видов рыб, обработано 404 образца тканей и органов, в которых рыб определено содержание цинка, меди, свинца и кадмия.

В результате исследований была выявлена видоспецифичность накопления отдельных металлов рыбами. Так, уровни аккумуляции цинка, меди, свинца и кадмия в мышцах леща, щуки, судака, окуня, налима, плотвы и язя из озера Воже показали следующие ряды накопления:

Zn: щука>язь>лещ>судак>плотва>налим>окунь>елец;
Cu: плотва>лещ>щука> окунь>налим>язь>судак>елец;
Pb: плотва>язь>налим> окунь>щука >лещ>елец>судак;
Cd: язь>плотва>лещ>щука > налим>окунь >елец>судак.

Кроме того, установлено, что в организме рыб озера Воже разные органы и ткани отличаются по уровню накопления элементов. В большинстве случаев наибольшее содержание тяжелых металлов характерно в таких органах, как печень и почки, а наименьшее – в мышцах. Так, средняя концентрация цинка в почках исследованных видов рыб составила 63 мг/кг, меди – 3,11 мг/кг, кадмия – 1,5мг/кг, свинца – 1,44 мг/кг, а в мышечной ткани – 4 мг/кг, 0,73 мг/кг, 0,23 мг/кг и 0,26 мг/кг соответственно.

В целом по уровню накопления тяжелых металлов отдельные органы можно ранжировать следующим образом:

Zn: почки > жабры > гонады > печень > сердце > мышцы;
Cu: сердце > почки > печень > гонады > жабры > мышцы;
Pb: почки > печень > сердце > жабры > гонады > мышцы;
Cd: почки > печень > жабры > гонады > мышцы> сердце.

Более подробно рассмотрим особенности накопления цинка, меди, свинца и кадмия в разных тканях и органах рыб. Исследования накопления цинка в организмах рыб озера Воже показали, что его содержание колеблется от 0,13 до 285 мг/кг сырой массы рыбы (табл. 1). При этом в наибольших количествах цинк накапливается в почках (2,4-285 мг/кг), далее следуют жабры (0,14-136 мг/кг), печень (1,1-128 мг/кг), гонады (1,0-152 мг/кг), сердце (3,1-37,5) и мышцы (0,13-10,2). Так, среднее содержание цинка в почках плотвы выше в сравнении с мышцами в 40 раз, щуки – 27, окуня – 17, леща, судака и язя – 7, налима – 3. Среди исследуемых видов рыб максимальное содержание цинка в печени и гонадах выявлено для плотвы, а в мышцах, почках и жабрах – для щуки. Превышение ПДК цинка отмечено для почек, печени, гонад и жабр. Так, у всех исследованных экземпляров щуки содержание цинка в жабрах и почках превышает уровень ПДК, у 43% плотвы – в жабрах; у 57% плотвы, 23% окуня, 3% леща – в печени; у 43% плотвы и 22% леща – гонадах; у 71% плотвы, 50% окуня и 22% леща – в почках.

Исследования накопления цинка в зависимости от возраста рыб не выявили каких либо закономерностей. Высокие концентрации этого элемента наблюдались как у рыб младших возрастных групп, так и у средних и старших. В тоже время анализ содержания цинка в тканях и органах леща, который был отловлен в разные сезоны года, выявил достоверные отличия в его содержании. Так, в осенне-зимний период концентрация цинка в печени и почках была в 3 раза выше в сравнении с весенним периодом. В тоже время весной в мышцах и жабрах они превышали таковые осеннего сезона

в 2 раза. Следует отметить, что выявленные показатели накопления цинка в рыбах служат тревожным индикатором процесса токсификации водоема, учитывая биоаккумулятивную способность этого элемента, наряду с высокой токсичностью.

Таблица 1

Содержание цинка (мг/кг) в тканях и органах рыб озера Воже (2004-2005 г.г.)

вид	мышцы	жабры	гонады	печень	почки	сердце
лещ	4,2 (0,13-6,2)	7,5 (0,14-26,3)	29,9 (4,5-91,7)	14,8 (1,1-74,2)	30 (2,4-111)	17,1 (3,1-37,5)
судак	3,5 (2,6-4,5)	7,1 (3,8-10,1)	16,5 (6,1-24,6)	8,4 (4,6-17,1)	23,1 (19,2-29,6)	16,9 (14,0-19,9)
щука	8,2 (6,3-10,2)	134 (132-136)	14,6 (10,4-18,7)	11,4 (7,6-15,2)	225 (215-285)	-
плотва	2,0 (0,65-6,3)	42,6 (20,1-84)	62,9 (13,4-152)	54,2 (19,6-128)	85,3 (27,8-118)	18,8
язь	5,2 (4,0-6,4)	49,4 (44,6-57,3)	77,3 (40,5-114)	10,5 (9-11)	30,1 (21,6-37,9)	12,8 (8,9-17,4)
окунь	2,4 (0,16-5,1)	7,0 (0,37-19,7)	9,3 (1,0-25,7)	27,6 (10-70,6)	40,3 (26,4-53,1)	-
налим	2,7 (2,5-2,8)	9,5 (9,0-10,0)	9,4 (8,4-10,5)	5,4 (5,6-5,9)	7,6 (7,0-8,3)	16,4 (15,5-17,4)

Несмотря на высокое содержание меди в воде озера Воже, которая постоянно превышает уровень ПДК, в организме обитающих в водоеме рыб концентрация этого элемента редко превышает установленную норму. Это связано, по-видимому, с малой доступностью ионов меди в присутствии в воде большого количества органических веществ и катионов кальция, которые образуют с ней комплексные соединения. Исследования накопления меди в организме рыб озера Воже показали, что ее содержание колеблется от 0,03 до 13,9 мг/кг сырой массы рыбы (табл. 2). При этом в наибольших количествах медь накапливается в сердце, содержание которой у всех исследованных видов рыб составляло (3,46 мг/кг), далее следуют печень и почки (2,98 мг/кг), гонады (1,36 мг/кг), жабры (0,81) и мышцы (0,77). Среди органов участвующих детоксикации организма содержание меди у плотвы и окуня выше в почках, а леща, судака, щуки, язя и налима – в печени.

Среди исследованных видов рыб максимальная концентрация меди отмечена в большинстве органов и тканях плотвы. Исключение составляют почки окуня, которые аккумулируют максимальные концентрации меди. У большинства рыб превышение ПДК меди в организме не наблюдается. Так, только у некоторых экземпляров плотвы отмечено повышенное содержание этого элемента в почках, печени и гонадах, а окуня – в почках. На интенсивность поглощения рыбами меди оказывают внешние факторы. Об этом свидетельствуют выявленные сезонные отличия в ее содержании в отдельных органах рыб, особенно жабрах. Так, в период весеннего половодья, когда в воде озера Воже увеличивается содержание меди и снижается концентрация кальция и органических веществ, в организме рыб идет интенсивное накопление этого элемента. Так, средняя концентрация меди в жабрах леща озера Воже в мае повышается в сравнении с осенне-зимним периодом в 2 раза.

Таблица 2

Содержание меди (мг/кг) в тканях и органах рыб озера Воже (2004–2005 г. г.)

вид	мышцы	жабры	гонады	печень	почки	сердце
лещ	0,92 0,03-1,35	0,95 0,07-1,92	1,21 0,24-4,65	3,58 0,38-12,2	2,54 0,49-7,0	4,77 1,81-8,68
судак	0,3 0,11-0,51	0,61 0,29-1,05	1,0 0,46-1,74	0,95 0,23-2,31	2,43 1,97-2,81	3,27 2,45-4,32
щука	0,75 0,58-0,92	0,7 0,65-0,75	0,58 0,43-0,72	1,06 0,61-1,51	0,87 0,68-1,06	-
плотва	1,32 0,14-2,70	1,79 0,06-6,5	3,98 0,73-12,1	6,78 2,2-13,3	6,03 0,58-12,8	4,06
язь	0,51 0,44-0,62	0,51 0,42-0,62	1,16 0,93-1,39	3,77 2,91-4,21	2,16 1,46-3,31	4,71 2,91-6,68
окунь	0,74 0,22-1,52	0,63 0,07-1,95	1,16 0,32-3,42	3,42 0,88-8,42	6,96 2,29-13,9	-
налим	0,6 0,12-1,52	0,41 0,39-0,42	0,43 0,31-0,59	1,37 1,08-1,66	0,71 0,31-1,11	1,09 0,85-1,52

Исследования накопления свинца в организме рыб озера Воже показали, что его содержание колеблется от 0,04 до 8,28 мг/кг сырой массы рыбы (табл. 3). При этом в наибольших количествах свинец накапливается в почках, в которых средняя его концентрация составляет (1,44 мг/кг), далее

следуют печень (0,77 мг/кг), сердце (0,56), гонады (0,36 мг/кг), жабры (0,32) и мышцы (0,26). Однако у окуня, щуки и налима содержание свинца выше в печени, а у леща, судака, язя и плотвы – в почках.

Таблица 3

Содержание свинца (мг/кг) в тканях и органах рыб озера Воже (2004-2005 г. г.)

вид	мышцы	жабры	гонады	печень	почки	сердце
лещ	0,23	0,28	0,29	0,44	0,79	0,44
	0,05-0,69	0,07-0,64	0,05-0,68	0,12-1,6	0,1-2,18	0,04-0,95
судак	0,16	0,21	0,24	0,26	0,98	0,29
	0,08-0,24	0,13-0,32	0,12-0,31	0,21-0,33	0,76-1,38	0,19-0,69
щука	0,23	0,27	0,2	0,29	0,24	-
	0,16-0,3	0,16-0,38	0,08-0,45	0,12-0,36	0,2-0,25	
плотва	0,3	0,74	0,36	2,17	1,26	0,26
	0,06-0,95	0,14-1,82	0,04-0,96	0,12-8,28	0,16-3,18	
язь	0,36	0,35	0,53	0,51	1,08	0,57
	0,17-0,72	0,21-0,46	0,51-0,54	0,43-0,62	0,9-1,29	0,05-0,67
окунь	0,25	0,48	0,34	1,46	5,36	-
	0,12-0,44	0,11-1,59	0,13-0,51	0,22-3,34	3,1-8,25	
налим	0,28	0,19	0,43	0,43	0,39	0,29
	0,2-0,35	0,17-0,21	0,31-0,54	0,41-0,45	0,37-0,41	0,19-0,42

Среди исследованных видов рыб максимальная концентрация свинца в мышцах, гонадах и сердце отмечена у язя, в печени и жабрах – у плотвы, а почках – у окуня. При установленном для рыбных продуктов ПДК свинца в 1 мг/кг, его концентрация превышала норму в жабрах 29% исследованных экземпляров плотвы и 14% – окуня, в печени 15% леща, 43% окуня и 57% плотвы, в почках всех окуней, 28% леща, 34% судака, 43% плотвы и 67% язя. Следует отметить, что свинец относится к неэссенциальным элементам и очень ядовит для животных и человека. Поэтому его накопление в рыбах свидетельствует о прогрессирующем процессе токсификации водоема. В целом в последнее десятилетие наблюдается глобальное повышение этого элемента в окружающей среде, что связано с ростом количества автомобилей [4].

Еще более опасным в сравнении со свинцом является кадмий. Выявленная для территории водосбора озера Воже высокая миграционная активность кадмия определяет и высокие уровни его накопления в рыбах [6, 9]. Так, в большинстве исследованных органов и мышечной ткани рыб концентрация кадмия превышала ПДК. Так, даже в мышцах, которые в меньшей степени накапливают этот элемент, установленная норма превышала у всех исследованных экземпляров щуки, плотвы и язя, 78% леща и 57% окуня. В тоже время ниже ПДК обнаружен кадмий в мышцах судака и налима.

В наибольших количествах накапливается кадмий в почках, далее следуют печень, сердце, жабры, гонады и мышцы. В тоже время, его концентрация у некоторых видов (щука, плотва) выше в печени в сравнении с почками. Среди исследованных видов рыб более высокие концентрации кадмия обнаружены в мышцах, печени, почках и сердце у язя, а жабрах и гонадах – у плотвы (табл. 4).

Высокая экологическая опасность кадмия для живых организмов связана с тем, что в малых концентрациях он способен вызывать серьезные нарушения. Основными причинами его повышения в окружающей среде являются транспорт, сжигание топлива, промышленность, применение удобрений. Поскольку кадмий является лабильным элементом, то в последние десятилетия активизация миграции кадмия в водные объекты связана также с кислотными выпадениями [4].

Таблица 4

Содержание кадмия (мг/кг) в тканях и органах рыб озера Воже (2004-2005 г. г.)

вид	мышцы	жабры	гонады	печень	почки	сердце
лещ	0,24	0,25	0,36	0,61	1,2	0,42
	0,05-0,56	0,08-0,74	0,04-1,3	0,12-1,96	0,94-4,2	0,0-0,81
судак	0,05	0,17	0,26	0,56	0,67	0,29
	0,02-0,07	0,0-0,39	0,0-0,54	0,18-0,66	0,62-0,77	0,18-0,39
щука	0,23	0,25	0,0	0,29	0,15	-
	0,22-0,24	0,23-0,29		0,19-0,38	0,1-0,19	
плотва	0,29	0,82	0,43	1,03	1,0	0,0
	0,13-0,69	0,15-1,9	0,25-0,95	0,31-2,4	0,27-2,09	
язь	0,43	0,36	0,06	1,3	3,5	0,51
	0,35-0,47	0,34-0,38	0,0-0,11	1,13-1,59	3,18-4,09	0,1-0,9
окунь	0,19	0,18	0,28	0,31	3,13	-
	0,06-0,4	0,0-0,35	0,08-0,91	0,15-0,57	0,52-5,3	
Налим	0,05	0,19	0,4	0,5	0,9	0,0
	0,0-0,09	0,17-0,20	0,34-0,45	0,18-0,84	0,83-0,96	

Таким образом, исследования содержания тяжелых металлов в органах и тканях рыб озера Воже, показали, что в наибольших количествах в организме рыб накапливается цинк, далее следуют медь, свинец и кадмий. При этом различные органы рыб в разной степени аккумулируют тяжелые металлы. Так, наибольшие концентрации элементов отмечены в органах участвующих в детоксикации организма (печень, почки), далее следуют сердце, жабры, гонады и мышцы. Однако эта общая схема может нарушаться, что связано с особенностями поступлений металлов в организм и их биохимической ролью.

Интенсивность накопления элементов рыбами определяется особенностями питания и местообитания. Так, среди 7 исследованных видов рыб наибольшее содержание тяжелых металлов отмечено в рыбах, которые потребляют растительность (плотва, язь), бентосных организмов (лещ). Из четырех представленных в ихтиофауне озера Воже хищных видов рыб, более высокие концентрации цинка и меди отмечены в щуке, а свинца и кадмия – в окуне. Для биофильных элементов (цинк и медь) характерны сезонные отличия в содержании этих элементов в организме рыб. Так, исследования накопления цинка и меди в организме леща показали, что их содержание в мышцах и жабрах выше в весенний период, тогда как в печени и почках в осенне-зимний.

Общий поток элементов в рыбной части сообщества определяется количеством и соотношением видов, их положением в цепях питания. В этом плане важным моментом, определяющим интенсивность миграции элементов по цепям питания, является соотношение в рыбной части сообщества экологических групп рыб по типу питания. Среди трех основных групп в больших количествах накапливают элементы фитофаги и бентофаги, что связано с более высокими концентрациями тяжелых металлов в объектах их питания. Дальнейший поток тяжелых металлов по трофической сети определяется особенностями питания хищных рыб, включая набор кормовых компонентов и размеры жертв.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моисеенко Т. И., Яковлев В. А. Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера. – Л.: Наука, 1990 – 221 с.
2. Моисеенко Т. И. Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики. – Апатиты, 1997. – С. 261.
3. Перевозников М. А., Богданова Е.А. Тяжелые металлы в пресноводных экосистемах. – СПб.: ГосНИОРХ, 1999. – 228 с.
4. Моисеенко Т. И., Кудрявцева Л. П., Гашкина Н. А. Рассеянные элементы в поверхностных водах суши: Технофильность, биоаккумуляция и экотоксикология. М.: Наука, 2006. 261 с.
5. Болотова Н. Л. Изменения экосистем мелководных северных озер в антропогенных условиях (на примере водоемов Вологодской области). Автореф. дис. д-ра биол. наук. – С-Пб., 1999. – 55с.
6. Борисов М. Я. Миграция тяжелых металлов в системе «водосбор–озеро Воже» и их накопление в рыбе // Экологическое состояние континентальных водоемов северных территории. – СПб.: Наука, ВВМ, 2005. – С. 248–257.
7. Брайнина Х. З., Нейман Е. Я., Слепушкин В. В. Инверсионные вольтамперометрические методы. – М., 1988. – 65 с.
8. Временная инструкция по применению устройств для компонентного мониторинга ионов тяжелых металлов в водных объектах. – СПб, 1995.
9. Борисов М. Я. Тяжелые металлы в почвах водосбора озера Воже Вологодской области // Современные экологические проблемы Севера. Материалы междунар. конф. Часть 1. – Апатиты, 2006. – С. 150–152.