

УДК 577.4; 549.25

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ, ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ И МЫШЦАХ РЫБ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ Р. АМУР

Л.М. Чухлебова¹, Н.В. Бердников²¹Хабаровский филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр» (ХФ ТИНРО-Центр), г. Хабаровск²Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, г. Хабаровск

Работа посвящена изучению распределения и накопления тяжелых металлов (ТМ) в системе – вода – взвеси – донные отложения – рыба р. Амур. Исследование сезонной динамики ТМ показало, что максимальные концентрации цинка, меди и свинца в водной среде наблюдались в апреле, а в донных осадках – в мае и октябре. Распределение кадмия в воде и взвешях равномерное; цинк, медь, и свинец в основном концентрируются во взвешях. Концентрации меди в мышцах рыб незначительна и не превышает ПДК для пищевой продукции. Исключением является содержание в мышечных тканях кадмия у коня пестрого и цинка – у карася, превышающие показатели ПДК для пищевой продукции.

В условиях интенсивного антропогенного воздействия нарушаются многие природные экосистемы. Равновесие водных экосистем в первую очередь зависит от физико-химических свойств воды. Антропогенное изменение в реках может вызывать повышение ее мутагенности до величин, опасных не только для гидробионтов, но и для человека. Выводятся из строя нерестилища, нарушается нормальный ход развития икры и личинок, ухудшаются условия нагула и зимовки рыб, нарушаются пути миграции, уничтожается кормовая база. Способность токсических веществ циркулировать по трофическим цепям представляет опасность для человека, употребляющего в пищу гидробионтов из отравленных водоемов. В отличие от токсичных органических веществ, тяжелые металлы (ТМ) в водных экосистемах не разлагаются и не деградируют, постоянно перераспределяясь по отдельным компонентам и накапливаясь в гидробионтах различных трофических уровней, включая рыб [11].

Для оценки экологического состояния водных экосистем широко применяется метод биогеохимической индикации, который позволяет в качестве индикаторов использовать воду с взвешенными веществами, донные отложения, планктон, перифитон, бентос, органы и ткани рыб для исследований биотического «отклика» на химическое изменение среды обитания [18]. Аккумуляции тяжелых металлов во взвешях в водоеме, переходу металлов в ионные формы, созданию особо опасных условий для фауны вследствие круговорота высоких концентраций тяжелых металлов способствуют механизмы активной трансформации за счет выщелачивания и микробиологических процессов. Донные отложения способны накапливать весь комплекс химических веществ, присутствующих в речной воде [8]. Для оценки экологического состояния водоемов большую роль играет информация о концентрации металлов в рыбах, которые являются удобными объектами исследования, позволяют установить степень влияния на живой организм различных факторов, в том числе токсикантов. Рыбы интегрируют не-

благоприятные воздействия, имеют большие размеры и продолжительность жизни, обладают резистентностью к сублетальным воздействиям различных веществ, могут быть использованы для прогноза различного рода влияния на водные экосистемы и здоровье человека, употребляющего их в пищу [2]. Исследования наличия микроэлементов в промысловых рыбах крайне необходимы, так как высокое содержание ряда ТМ может привести к остановке роста рыб и уменьшению их популяции [10].

Основная цель работы – оценка экологического благополучия участка р. Амур вблизи пос. Синда путем изучения распределения и накопления подвижных форм ТМ в системе: вода – взвеси – донные отложения – рыба (рис. 1). Для этого было исследовано содержание и накопление ТМ в отдельных компонентах реки: воде, взвешенном веществе, донных отложениях, мышечных тканях рыб, проведен анализ движения ТМ и определены компоненты экосистемы, максимально накапливающие их.

Материал и методы исследования

Отбор проб основных компонентов экосистемы в русле реки проводили на стационаре Хабаровского филиала ТИНРО-центра, расположенном в 120 км от г. Ха-

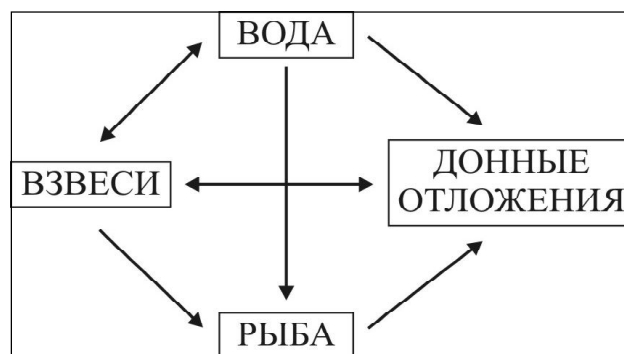


Рис. 1. Схема взаимодействия компонентов экосистемы: вода, взвеси, донные отложения, рыба.

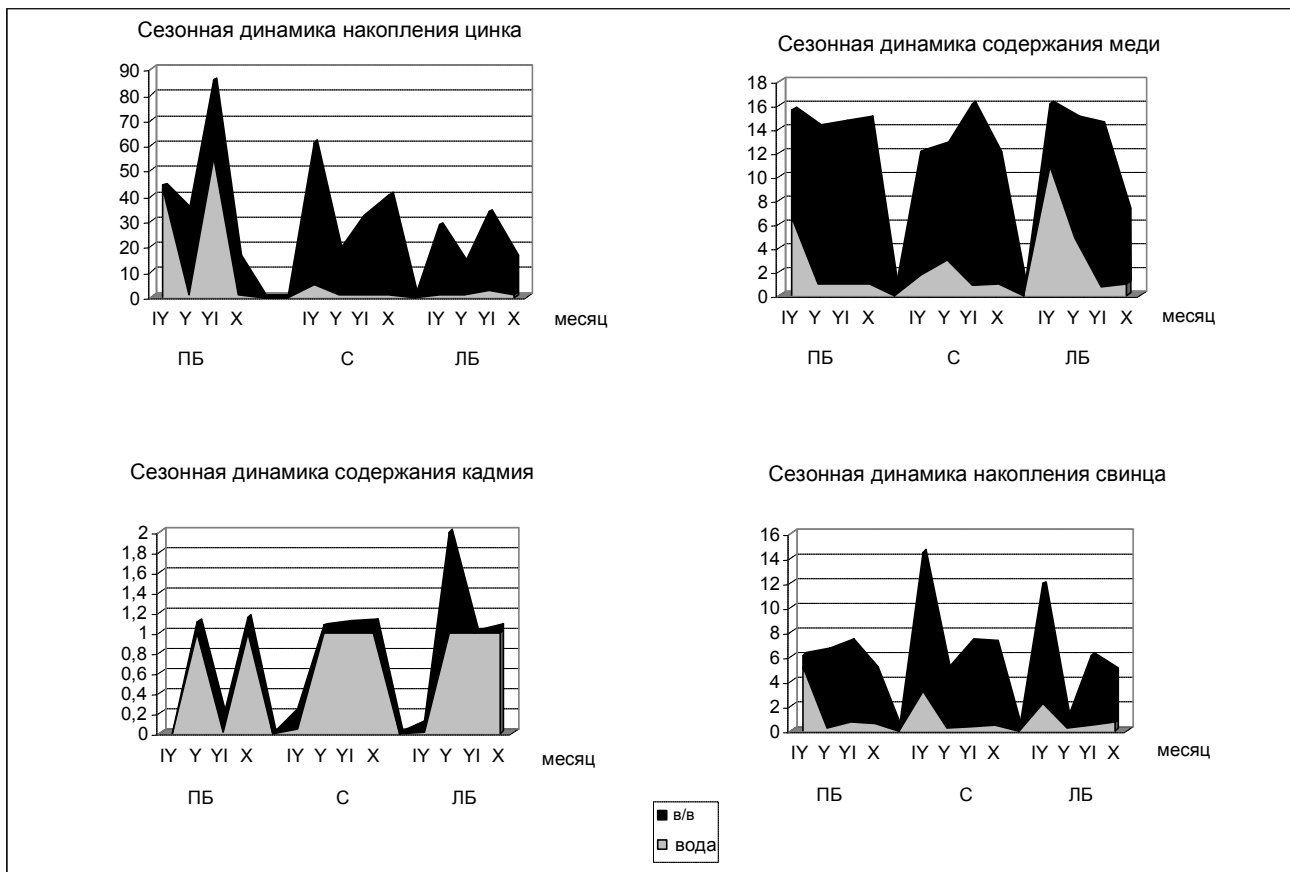


Рис. 2. Концентрация тяжелых металлов в воде и взвешях р. Амур, где ПБ – правый берег, С – середина, ЛБ – левый берег, в/в – взвешенное вещество (взвеси); IV, V, VI, X – апрель, май, июнь, октябрь

баровска вниз по течению реки (пос. Синда), где с 2001 года по настоящее время проводятся экологические исследования качества воды и рыбы. Пробы воды и донных отложений отбирались по периметру реки (правый берег, середина, левый берег) с апреля по октябрь 2007 г., там же проводился отлов рыбы.

Пробы воды, согласно ПНДФ 14.1.2.4.143–98, фильтровались и помещались в специальные пластиковые контейнеры производства Perkin Elmer Instr., США, емкостью 50 мл, в которые заранее был добавлен консервант – 1,5 мл концентрированной азотной кислоты. Фильтры с взвешенным веществом и пробы донных отложений высушивались, растирались и подвергались кислотному разложению. Определение элементного состава воды, взвешенных веществ, донных отложений и рыбы проводили в Институте тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (прибор Elan DRC II, PerkinElmer, США). Результаты обрабатывались методом вариационной статистики [5].

Результаты исследования

Тяжелые металлы в воде и во взвешенном веществе.

Сезонную динамику содержания ТМ в воде на изучаемом участке реки Амур приведем по элементам.

Zn. Максимальная для изучаемого района концентрация цинка обнаружена в апрельских (43,19 мкг/л) и июньских (55,04 мкг/л) пробах воды возле правого бере-

га. Она превышала ПДК для рыбохозяйственных водоемов [16] в 4 и 5,5 раз, соответственно. Высокая концентрация цинка зафиксирована в апрельских пробах воды с середины реки (4,98 мкг/л), а также в июне возле левого (2,57 мкг/л) и августе у правого (3,23 мкг/л) берегов.

Cu. Максимальная для изучаемого района реки концентрация меди обнаружена в апреле у левого (10,9 мкг/л) и правого (6,55 мкг/л) берегов, на середине реки (1,69 мкг/л), что превышает ПДК для рыбохозяйственных водоемов (ПДК_{р.х.}) в 10, 6 и 1,5 раз, соответственно. Высокая концентрация меди зафиксирована в майских пробах воды у левого берега (4,85 мкг/л) и на середине реки (2,94 мкг/л), в августе – в пробах у правого и левого берегов (2,40 и 1,24 мкг/л) и на середине (3,17 мкг/л), что также выше предельно допустимых.

Cd. В апрельских пробах его концентрация составляет: у правого берега – 0,025 мкг/л, на середине реки – 0,046 мкг/л, то есть не превышает ПДК_{р.х.}, в остальных пробах он не обнаружен.

Pb. Максимальная для района исследования концентрация зафиксирована в апрельских пробах воды у правого берега (5,19 мкг/л), на середине реки (3,21 мкг/л) и у левого берега (2,21 мкг/л), что также не превышает ПДК_{р.х.}.

По исследованиям 2007 г., существенная доля меди, цинка и свинца концентрируется во взвешенном веществе, в то время как содержание кадмия в воде и во взвешях почти одинаково (рис. 2).

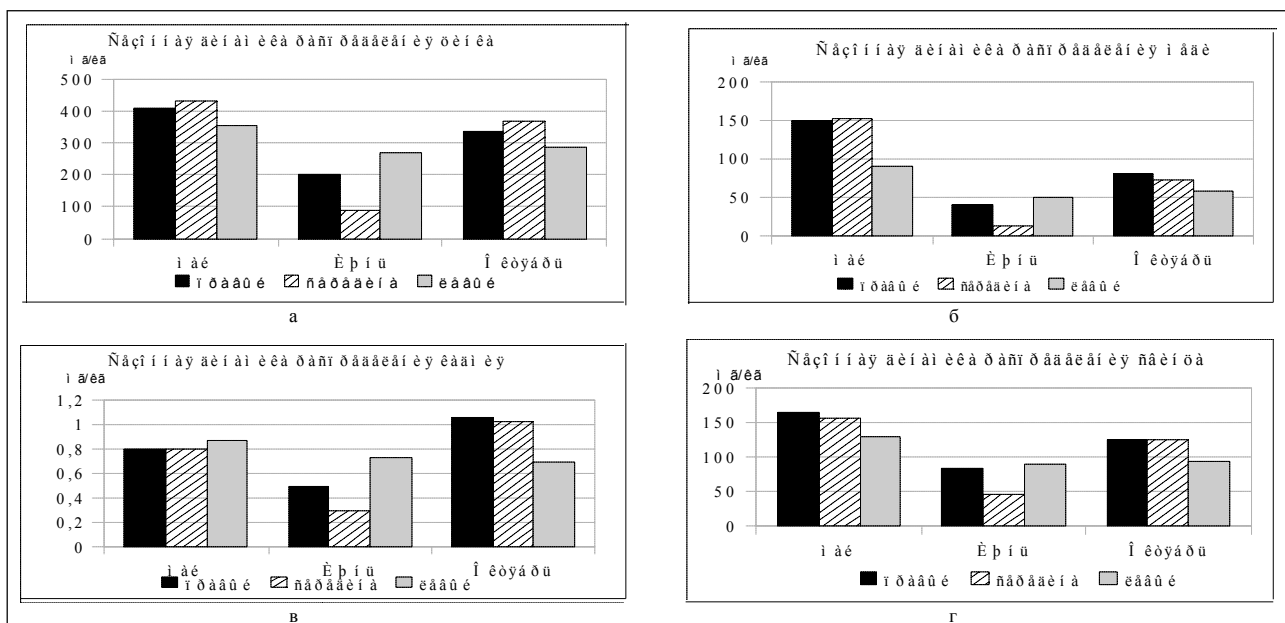


Рис. 3. Сезонная динамика накопления ТМ в донных отложениях р. Амур (мг/кг):
а – цинк; б – медь; в – кадмий; г – свинец

Содержание тяжелых металлов в донных отложениях.

Первые исследования по содержанию ТМ в донных отложениях Амура приведены в работе Ф.С. Кота [4], и мы предлагаем рассматривать их в качестве фоновых показателей. Динамика накопления ТМ в донных отложениях на исследованном участке р. Амур приведена на рис. 3.

Исследования показали, что донные отложения Амура в основном загрязнены цинком, его максимальная концентрация обнаружена в мае по всей ширине реки (до 430,9 мг/кг). Высокая отмечена в октябре (до 396,14 мг/кг) и июне (до 267,52 мг/кг) по всему руслу реки. Достаточно много в донных отложениях Амура свинца и меди. Анализ сезонного распределения ТМ в донных отложениях показал, что накопление их происходит преимущественно весной (май) и осенью (октябрь). Содержание ТМ летом (июнь) незначительно и связано, вероятно, с вымыванием и выносом их в воду.

Концентрация тяжелых металлов в мышечных тканях амурских рыб.

Показателем степени вовлечения исследуемых элементов в биологический цикл может служить состав живого вещества, например ихтиофауна территории. Для анализа были отобраны пробы мышечной ткани групп рыб старшего возраста. Известно, что положительная корреляция установлена между содержанием меди, цинка, свинца в мышцах рыб и их возрастом (в основном представителями старшей возрастной группы) [1]. В таблице даны результаты исследований по содержанию ТМ в мышечных тканях амурских видов рыб, отловленных в период открытого русла.

Наши исследования показали, что концентрация соединений цинка в мышцах амурских видов рыб по сравнению с другими металлами была высокой и измерялась в широких пределах, что может свидетельствовать об ак-

тивном участии этого металла в обменных процессах. Высокие показатели цинка отмечены у отловленных осенью белого толстолобика (ниже значений ПДК) и карася, но уже с превышением ПДК [13]. Медь в мышцах исследованных видов рыб содержится в небольших количествах, относительно ПДК для пищевых продуктов. Наивысшая концентрация кадмия (выше показателя ПДК для пищевых объектов) обнаружена у коня пестрого (0,26 мг/кг), отловленного летом и осенью, что предполагает миграцию кадмия в составе клеток других водных организмов, составляющих основу кормовой базы этих видов рыб [14]. Также считают, что этот элемент обладает определенным влиянием на некоторые ферменты и гормоны и необходим организмам для углеродного обмена [10]. Превышения ПДК для пищевых объектов по содержанию свинца в мышцах обнаружены у карася и косатки, отловленных осенью.

Обсуждение результатов

Исследования показали, что в контактных зонах вода–взвешенное вещество, вода–донные отложения существуют сезонные изменения в миграциях ТМ. В летнее время вследствие разбавления талыми водами и биоаккумуляции гидробионтами содержание ТМ в воде значительно снижается. У правого берега Амура в апреле концентрируются соединения цинка и свинца, а у левого берега – меди. Многолетние наблюдения за накоплением ТМ в водной среде свидетельствуют о высокой концентрации меди в основном русле Амура и относительно высоком содержании цинка. Уровень содержания кадмия и свинца в основном русле реки не превышает ПДК_{р.х.} [6].

Соединения цинка, меди и свинца во взвесах со временем оседают на дно и аккумулируются в донных осадках по всему периметру реки. Содержание кадмия невысокое, и накопление его происходит за счет процессов сорбции, выпадения в осадок гидроксила и карбоната

Т а б л и ц а
Сезонные изменения концентрации тяжелых металлов в
мышцах отдельных видов рыб, мг/кг сырой массы

ПДК (для пищевых продуктов)	10,0	40,0	0,2	1,0
Конь пестрый – <i>Hemibarbus maculatus</i> (Bleeker, 1871)				
Период	Cu	Zn	Cd	Pb
Весна	$\frac{0,43-1,98}{0,96}$	$\frac{3,48-14,80}{6,58}$	$\frac{0,001-0,04}{0,01}$	$\frac{0,01-0,05}{0,01}$
Лето	$\frac{0,001-1,04}{0,63}$	$\frac{1,57-20,30}{9,75}$	$\frac{0,13-0,26}{0,20}$	$\frac{0,001-0,07}{0,05}$
Осень	$\frac{0,24-0,71}{0,42}$	$\frac{6,15-16,90}{11,25}$	$\frac{0,02-0,26}{0,10}$	$\frac{0,02-0,06}{0,04}$
Карась серебряный – <i>Carassius auratus</i> (Linnaeus, 1758)				
Весна	$\frac{0,29-0,84}{0,51}$	$\frac{2,33-4,88}{3,25}$	$\frac{0,001-0,02}{0,01}$	$\frac{0,001-0,02}{0,01}$
Лето	$\frac{0,24-0,99}{0,76}$	$\frac{6,87-20,98}{17,73}$	$\frac{0,001-0,04}{0,02}$	$\frac{0,001-0,06}{0,02}$
Осень	$\frac{0,24-8,06}{3,16}$	$\frac{16,90-42,48}{32,37}$	$\frac{0,001-0,02}{0,01}$	$\frac{0-0,05}{0,02}$
Косатка – <i>Pseudobagrus ussuriensis</i> (Dybowski, 1872)				
Весна	$\frac{0,11-3,40}{1,08}$	$\frac{3,01-6,82}{4,71}$	$\frac{0,001-0,01}{0,003}$	$\frac{0,001-0,04}{0,01}$
Лето	$\frac{0,17-0,82}{0,41}$	$\frac{4,58-6,95}{6,35}$	$\frac{0,02-0,07}{0,03}$	$\frac{0,015-0,03}{0,02}$
Осень	$\frac{0,36-3,33}{1,13}$	$\frac{11,48-17,41}{13,90}$	$\frac{0-0,11}{0,03}$	$\frac{0,05-1,72}{0,64}$
Толстолобик белый – <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> (Valenciennes, 1844)				
Весна	$\frac{0,64-1,41}{1,03}$	$\frac{0,96-5,06}{3,01}$	$\frac{0,03-0,09}{0,06}$	$\frac{0,001-0,03}{0,02}$
Лето	$\frac{0,001-5,73}{1,75}$	$\frac{0,001-22,20}{7,74}$	$\frac{0-0,11}{0,05}$	$\frac{0-0,03}{0,006}$
Осень	$\frac{0,66-1,61}{1,23}$	$\frac{13,18-29,42}{20,16}$	Не обнаружено	$\frac{0,02-0,06}{0,04}$

Примечание: N (количество экз. рыб) = 5; (в числителе - диапазон изменений, в знаменателе - среднее значение)

кадмия и потребления этих соединений водными организмами.

Изучению ТМ в донных отложениях нижнего Амура посвящены работы многих исследователей [4, 14]. Сток наносов реки определяется гидрологическим режимом, а также строением рельефа, свойствами почв, степенью заболоченности и особенностями антропогенной деятельности в ее бассейне. Сочетание этих условий определяет в целом мутность реки. Среднее годовое количество наносов у г. Хабаровска составляет 24 млн. т (средний расход взвешенных наносов 760 кг/с) [11]. Водная эрозия интенсивно появляется в теплый период времени. В весенне-летний период (апрель – сентябрь) величина твердого стока составляет 87 % годового объема, а в отдельные годы – 91 %. Средняя мутность воды в р. Амур у г. Хабаровска составляет 94 г/м³, максимальная – 400

г/м³, в районе г. Комсомольска-на-Амуре 66 г/м³ и 220 г/м³ соответственно [12]. Донные отложения Амура обогащены цинком, свинцом, в меньшей степени – медью. Известно, что их состав является отражением геохимического состояния дренируемого бассейна и чаще всего связан с глинистыми компонентами, которые поступают с территории водосбора или с автохтонными органическими веществами (отмирающие гидробионты), соединения меди, цинка, кадмия и свинца аккумулируются фитопланктоном, что подтверждается научными данными [14]. Наличие цинка и меди в различных видах почв Приамурья хорошо согласуется с их содержанием в донных отложениях [3]. Высокая концентрация цинка в последних свидетельствует об антропогенном воздействии.

Таким образом, донные отложения Амура обогащены свинцом и цинком, что соответствует высокому фону их в почвах и является их региональной особенностью [4]. Максимальная концентрация соединений цинка в весенне-летний период в избытке поступает в донные отложения, что выше фоновых значений в 4–5 раз.

Рыбы занимают верхний уровень в трофической системе водоемов. В их организм ионы меди, цинка и кадмия поступают преимущественно с пищей [15], но поступление с водой также играет значительную роль, особенно в условиях дефицита микроэлементов в пище и высоких концентрациях ТМ в воде [17]. В мышечных тканях толстолобика не обнаружены медь, цинк и свинец, исключение составляет лишь высокая концентрация цинка в мышцах карася (42,48 мг/кг), отловленного осенью. Высокая концентрация кадмия в мышцах рыб, выше ПДК (0,2 мг/кг), обнаружена в тканях коня пестрого (0,26 мг/кг), отловленного летом и осенью, что свидетельствует о возможной миграции значительной его части в составе клеток гидробионтов [16].

Мы провели сравнительную оценку показателей 2007 г. с результатами прошлых лет. В период зимней межени 1997 г. в рыбе с нижнего Амура отмечалось превышение ПДК для пищевых продуктов по кадмию и цинку. Превышение норм содержания отдельных химических элементов в рыбе обусловлено их биоаккумуляцией фитопланктоном и сестоном [14]. Как известно, высокий уровень содержания цинка наблюдается в мышцах рыб, непосредственно контактирующих с внешней средой, и преобладанием его в речных водах [6]. Превышение концентрации кадмия в мышечных тканях рыб свидетельствует о создании тревожной обстановки в водоеме, так как кадмий относится к токсичным соединениям, хотя считают, что этот элемент обладает определенным влиянием на некоторые ферменты и гормоны и, по-видимому, необходим для углеродного обмена [16]. В периоды зимней межени на Амуре 2002–2006 гг. рыбы в меньшей степени содержали ионы ТМ (по сравнению с отловленными в этот же период в 1997 г.). Так, в 2007 г. уровень содержания меди и цинка в мышцах рыб был на уровне 1997 г., однако концентрация свинца и кадмия в мышечных тканях рыб значительно снизилась.

Относительное содержание некоторых ТМ в мышцах рыб в период открытого русла можно объяснить интенсивным вымыванием из атмосферы и поступлением заг-

рязняющих веществ в водоемы. Важную роль играют также кормовые условия. Поскольку повышенное содержание ТМ наблюдается у коня пестрого с бентосным типом питания, а нагульный период приходится на летние месяцы и начало осени, увеличение содержания ТМ связано с поступлением их с пищевыми компонентами.

Выводы

Проведенные исследования показали, что в основном русле р. Амур (п. Синда) водные объекты экосистемы чутко реагируют на загрязнение ТМ. Максимальная концентрация цинка, меди и свинца отмечена во взвесьях. Соединения кадмия присутствуют и в воде, и во взвесьях. Высокая концентрация металлов наблюдается в основном в донных отложениях, где прогрессирующее накопление в них свинца и кадмия особенно опасно. Донные отложения исследуемого участка реки обогащены соединениями цинка, меди, свинца, особенно в весенне-осенний период, в летний – ТМ практически не были обнаружены, возможно, это связано с повышением уровня водности и их выносом в воду.

Концентрация меди в мышцах рыб незначительна и не превышает ПДК для пищевых продуктов. Исключением является содержание кадмия в мышечных тканях у коня пестрого и цинка – у карася, превышающее показатели ПДК для пищевой продукции.

Таким образом, наши исследования показали, что интенсивное накопление меди и кадмия происходит в донных отложениях, а цинка – во взвесьях. Данные биогеохимических анализов накопления ТМ в донных отложениях свидетельствуют о том, что экологическая обстановка на изученном участке реки напряженная. В системе вода – взвеси – донные отложения – рыба наиболее высокие концентрации тяжелых металлов отмечены в донных осадках, что может способствовать постепенному вымыванию их в водную среду и неблагоприятному воздействию на гидробионтов, в частности на рыб.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гомбоева С.В., Пронин Н.М. Возрастные изменения содержания тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd, Pb) в органах и тканях плотвы сибирской и щуки селенгинского мелководья оз. Байкал // Экология. 2007. № 4. С. 314–316.
2. Кашулин Н.А. Ихтиологические основы биоиндикации загрязнения среды тяжелыми металлами: автореф. дис. ... д-ра. биол. наук. Петрозаводск, 2000. 42 с.
3. Ковда В.А., Василевская В.Д. Исследование содержания микроэлементов в почвах Приамурья // Почвоведение. 1958. № 12. С. 68–76.
4. Кот Ф.С. Тяжелые металлы в донных отложениях Среднего и Нижнего Амура // Биогеохимические и эко-

- логические оценки техногенных экосистем бассейна реки Амур. Владивосток: Дальнаука, 1994. С. 123–135.
5. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1968. 288 с.
6. Методические указания по установлению эколого-рыбохозяйственных нормативов (ПДК и ОБУВ) загрязняющих веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение / под ред. О.Ф. Филенко. М.: ВНИРО, 1998.
7. Механизмы образования токсичных соединений, вызывающих загрязнение воды и отравление рыбы в нижнем течении р. Амур / Научный отчет. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 1999. 132 с.
8. Мизандронцев И.Б. Химические процессы в донных отложениях водоемов. Новосибирск: Наука, 1990. 175 с.
9. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1986. Т. 1, Вып. 9. 412 с.
10. Немова Н.Н. Биохимическая индикация состояния рыб. М.: Наука, 2004. 215 с.
11. Никаноров А.М., Жулидов А.В., Покаржевский А.Д. Биомониторинг тяжелых металлов в пресноводных экосистемах. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 144 с.
12. Основные гидрологические характеристики. Л.: Гидрометеиздат, 1978. Т. 18, Вып. 2. 97 с.
13. Санитарные правила и нормы (СанПиН) 2.3.2.560–96. Гигиенические требования к качеству и безопасности продовольственного сырья и пищевых продуктов. М., 1997. 269 с.
14. Сиротский С.Е., Макаренко Е.А., Макаренко М.А., Медведева Л.А. Оценка качества вод бассейна р. Амур по гидробиологическим показателям // Амур на рубеже веков. Ресурсы, проблемы, перспективы. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 1999. Ч. 1. С. 36–38.
15. Bury N.R., Walker P.A., Glover C.N. Nutritive metal uptake in teleost fish // J. Exp. Biol. 2003. V. 206. № 1. P. 11–23.
16. Brown D.A., Bay S.M., Hershelman G.P. Exposure of scorpionfish (*Scorpaena guttata*) to cadmium: effects of acute and chronic exposures on the cytosolic distribution of cadmium, copper and zinc // Aquat. Toxicol. 1990. V. 16. № 4. P. 295–310.
17. Kamunde C.N., Grosell M., Higgs D., Wood C.M. Copper metabolism in actively growing rainbow trout interactions between dietary and waterborne copper uptake // J. Exp. Biol. 2002. V. 205. № 2. P. 279–290.
18. Kuznetsova A.J., Zarubina O.V., Leonova G.A. Comparison of Zn, Cu, Pb, Ni, Cr, Sn, Mo concentrations in tissues of fish (roach and perch) from lake Baikal and Bratsk reservoir. Russia // Environ. Geochem. Health. 2002. № 24. P. 205–213.

The article deals with the study of heavy metals distribution and accumulation in the Amur River system: water – suspended matter – bottom sediment – fish. The seasonal dynamics investigation has shown maximum concentrations of Zn, Cu and Pb in the water in April, and in the bottom sediment – in May and October. A distribution of Cd in the water is equal to that in the suspended matter, while most of Zn, Cu and Pb concentrate in the suspended matter. The Cu quantity in fish muscular tissue doesn't exceed the PDC for food substance, but the excess of Cd and Zn was detected at some species.