

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ОРГАНАХ  
И ТКАНЯХ РЫБ РАЗЛИЧНЫХ СЕМЕЙСТВ

Е. А. ГАЛАТОВА\*

Исследования посвящены изучению особенностей накопления и распределения тяжелых металлов в органах и тканях рыб различных семейств в зависимости от антропогенного воздействия. Выявлено, что содержание тяжелых металлов в органах и тканях рыб различных семейств в ряде случаев превышает гигиенические нормативы, установленные для пищевых продуктов. Из числа контролируемых гидрохимических показателей во все сезоны года превышают ПДК взвешенные и оседающие вещества, изменяющиеся в интервалах 9,11—15,92 и 5,97—7,93 мг/дм<sup>3</sup> при снижении прозрачности речной воды до 13,50±0,42 см — весной.

**Ключевые слова:** ткани рыб, тяжелые металлы, пробы воды, донные отложения, гидрохимические показатели, водоросли, санитарно-гигиенические нормативы.

Челябинская обл. расположена на водоразделе бассейнов трех рек — Волги, Урала и Тобола, являющихся основными источниками водоснабжения всех отраслей народного хозяйства и населения Южного Урала. По гидрохимическому состоянию поверхностных вод Челябинская обл. относится к наиболее напряженной группе территорий Российской Федерации. Причиной такого состояния является постоянный и многолетний сброс загрязненных промышленными и хозяйственно-бытовыми отходами вод, поверхностных стоков с полей и животноводческих ферм в водные объекты [7, 9, 2]. Наиболее опасными загрязнителями окружающей среды признаны соединения химической природы, в т.ч. тяжелые металлы [6, 4, 1, 11].

Экстенсивное развитие хозяйства привело к тому, что качество воды большинства природных источников в настоящее время уже не соответствует нормативным требованиям [8]. Тяжелые металлы (свинец, кадмий, никель, цинк, медь и др.) обладают

выраженной мутагенной и канцерогенной активностью. Попав в водоем или реку, металл-токсикант распределяется между компонентами этой водной экосистемы: растворяется в воде, сорбируется и аккумулируется фитопланктоном, удерживается донными отложениями, находится в адсорбированной форме на частицах взвеси [15].

В связи с тем, что распределение металлов в организме рыб зависит от геохимии среды обитания, функционального состояния организма и характера пищевых цепей водоемов, объединяющих в единую систему миграции элементов растительного и животного мира конкретных регионов, выявление особенностей накопления и распределения тяжелых металлов в организме рыб вызывает несомненный интерес. Рыбы, являясь ключевыми видами гидробионтов и выступающие, как правило, в качестве одного из последнего звена в трофических цепях, обладают способностью накапливать сверхкритические концентрации загрязняющих веществ [3, 5, 10].

Челябинский государственный университет, Троицкий филиал

Целью исследования является изучение особенностей накопления и распределения тяжелых металлов в органах и тканях рыб различных семейств на участке водотока реки Уй, подверженном антропогенному воздействию.

### Методика

Материалом для исследований служили органы и ткани рыб семейств Percidae (окунь, ерш, судак), Cyprinidae (плотва, пескарь, верховка), Esocidae (щука), Siluridae (сом).

В пробах воды определяли содержание взвешенных веществ гравиметрическим методом (ПНД Ф 14.1:2.110-97); сухой остаток — методом гравиметрии (ПНД Ф 14.1:2.114-97); концентрацию водородных ионов (рН) устанавливали потенциометрическим методом с помощью рН-метра (ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97); концентрацию ионов аммония — методом фотометрии по реакции с реактивом Несслера (ПНД Ф 14.1.1-95); массовую концентрацию нитрат-ионов — фотометрическим методом с салициловой кислотой (ПНД Ф 14.1:2.4-95); содержание нитритов — методом фотометрии с реактивом Грисса (ПНД Ф 14. 1: 23-95); измерение массовой концентрации сульфат-ионов — турбидиметрическим методом (ПНД Ф 14.1:2.159-2000); измерение содержания хлоридов — аргентометрическим методом (ПНД Ф 14.1:2.96-97); измерение массовой концентрации фосфат-ионов — фотометрическим методом восстановлением аскорбиновой кислотой (ПНД Ф 14.1:2.112-97); содержание растворенного кислорода — йодометрическим методом (ПНД Ф 14.1:2.101- 97); измерение биохимического потребления кислорода (ПНД Ф 14.1:2:3:4.123-97) — по способности микроорганизмов потреблять растворенный кислород при биохимическом окислении органических и неорганических веществ в воде; определение перманганатной окисляемости воды — по окислению веществ перманганата калия в сернокислой среде (ПНД Ф

14.1:2:4.154-99); химическое потребление кислорода — бихроматным методом (ПНД Ф 14.1:2.100-97); измерение массовой концентрации нефтепродуктов — методом колоночной хроматографии с гравиметрическим окончанием (ПНД Ф 14.1:2.116-97); определение СПАВ — методом фотоколориметрии (ПНД Ф 14.1.15-95); концентрацию тяжелых металлов (меди, цинка, кобальта, железа, марганца, свинца, никеля, кадмия) — методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (ГОСТ 26929-94; 30178-96).

Интегральную оценку загрязненности речной воды определяли по формуле:

$$ИЗВ = (\sum C_i / ПДК_i) / N,$$

где  $C_i$  — концентрация компонента;  $N$  — число показателей, используемых для расчета индекса; ПДК $_i$  — установленная величина для соответствующего типа водного объекта.

Безвредность воды устанавливали по содержанию определяемых металлов при условии:  $\sum C_i / ПДК_i = 1$ , где  $C_i$  — концентрация  $i$ -го металла в воде; ПДК $_i$  — предельно допустимая концентрация этого металла;  $i$  изменяется от 1 до  $p$ .

Отбор проб воды проводили согласно ГОСТ Р 51592-2000 «Вода. Общие требования к отбору воды». Отбор проб донных отложений, водорослей и биоматериала на содержание тяжелых металлов проводили в те же сроки, что и для гидрохимических показателей. Донные отложения отбирали с помощью грунтоотборника (РД 52.18.191-89). Сбор водорослей проводили согласно стандартным методикам, общепринятым в гидробиологических исследованиях (ГОСТ 26929-94). Всего было отобрано 2000 образцов воды, 80 — донных отложений; 90 — водорослей; 2160 — рыбы и проведено 4330 исследований. При обработке результатов гидрохимического анализа воды использовали перечень ДОК, ПДК, санитарно-гигиенические нор-

мативы вредных веществ в водных объектах.

Статистическую обработку полученных результатов проводили общепринятыми методами вариационной статистики в соответствии с рекомендациями Г.Ф. Лакина (1990) и использованием программы Excel на PC ЭВМ. Достоверную вероятность устанавливали с учетом числа имеющихся наблюдений по таблице Стьюдента. Различия считали достоверными при  $P < 0,05$ . Статистическую обработку данных на содержание металлов в органах и тканях рыб разных видов проводили с помощью трехфакторного дисперсионного анализа (факторы: виды рыбы, органы, металлы). Для выявления наиболее общих закономерностей использовали аппарат оптимального многомерного шкалирования CatPCA (главные компоненты для категориальных признаков), реализованный в модуле редукции данных пакета SPSS for Windows (v. 12.0.0).

Расчеты и графические построения выполнены в статистических пакетах Statistica for Windows (v.6.0, StatSoft Inc.), KyPlot (v.2.0 beta 15) и SPSS for Windows (v. 12.0.0., SPSS Inc.). Во всех случаях эффекты считали статистически значимыми при вероятности нулевой гипотезы  $P < 0,05$ , незначимыми — при  $P > 0,10$ . В промежуточных случаях ( $0,05 < P < 0,10$ ) обнаруженные закономерности рассматривали как тенденции.

## Результаты и их обсуждение

*Органолептические и гидрохимические показатели речной воды.* Основным источником питьевого водоснабжения города Троицка является река Уй, которая со своими притоками входит в систему реки Тобол и испытывает значительную техногенную нагрузку из-за влияния сточных вод филиала ОАО «ОГК-2» — Троицкая ГРЭС, городских очистных сооружений, завода ЖБИ.

Проведенными гидрохимическими исследованиями установлено, что содержание взвешенных веществ в исследуемой воде достаточно высокое на протяжении всего исследуемого года. Интенсивное нарастание, достигающее  $15,92 \pm 0,22$  и  $18,86 \pm 0,31$  мг/дм<sup>3</sup>, наблюдается весной и летом. В осенний период концентрация взвешенных веществ снижается до  $9,11 \pm 0,19$  мг/дм<sup>3</sup>, но превышает ПДК на 8,45%. Зимой содержание взвешенных веществ составляет  $8,86 \pm 0,35$  мг/дм<sup>3</sup> при допустимом уровне 8,40 мг/дм<sup>3</sup>. На этом фоне аналогично изменяется концентрация оседающих веществ, их максимальные концентрации регистрируются также в весенний и летний период и составляют 1,17 и 1,45 ПДК.

Уменьшение значения pH регистрируется в весенний и осенний периоды и составляет 6,94 и 6,80 соответственно. В летний период pH заметно повышается, достигает 7,82, что, по-видимому, объясняется тем, что в это время происходит интенсивный фотосинтез, при котором pH открытых водоемов повышается.

Аналогичная закономерность установлена и в сезонной динамике азота нитритов в речной воде. Если зимой и летом уровень содержания нитритов достигал 7,38 и 9,12 ПДК соответственно, то летом и осенью он снижается и составляет 4,0 и 3,0 ПДК соответственно. Содержание азота нитратов в речной воде было также повышенным на протяжении всего периода наблюдений и составило от  $59,12 \pm 2,04$  мг/дм<sup>3</sup> осенью и до  $99,26 \pm 3,35$  мг/дм<sup>3</sup> весной.

Наиболее высокое значение перманганатной окисляемости наблюдалось весной и составило  $10,80 \pm 0,43$  мг/дм<sup>3</sup> при допустимой концентрации 7,0 мг/дм<sup>3</sup>, что объясняется загрязнением воды поверхностным стоком во время паводков. Высокие значения перманганатной окисляемости воды сохранялись летом и составили  $8,50 \pm 0,34$  мг/дм<sup>3</sup>, что выше ПДК в 1,2 раза.

Наиболее высокие значения БПК<sub>5</sub>, превышающие ПДК для водоемов культурно-бытового водоиспользования в 2,33-2,56 раза, нами установлены в зимний и весенний период. Увеличение БПК<sub>5</sub> в весенний период обусловлено прежде всего поступлением в реку Уй богатого органическими веществами поверхностного стока, который смывается частично талыми и ливневыми водами. Динамика растворенного кислорода показывает, что большое количество кислорода речной воды расходуется для дыхательной деятельности микроорганизмов, использующих органическое вещество из исследуемых вод для роста и метаболизма. Максимальное содержание в речной воде органических соединений (рассчитано по ХПК), включающих в себя как легко-, так и трудноокисляемые, установлено весной. При сравнении с ПДК этот показатель превысил норматив в зимний период в 2,14, весенний — в 3,52; летний — в 2,8 и осенний — в 2,43 раза.

Из специфических гидрохимических показателей превышают ПДК СПАВ, нефтепродукты и тяжелые металлы. Отрицательное воздействие СПАВ на водоемы связано с очень низкой скоростью их разложения в воде. Полифосфатные связывающие агенты в воде гидролизуются, образуя монофосфаты, и поставляют биогенный элемент фосфор в водоем, вызывая тем самым разрастание водных растений с последующим отмиранием, т.е. эвтрофикацию водоема. Очень медленное биохимическое окисление свойственно нефтепродуктам.

Тяжелые металлы — наиболее распространенная группа токсичных, трудноокисляемых загрязнений, присутствующих как в сточных, так и в природных водах. Определение содержания в воде реки Уй тяжелых металлов показало, что массовая концентрация цинка весной составила  $25,48 \pm 1,12$  мг/дм<sup>3</sup> и превысила допустимый уровень в 5,1 раза. Высокий уровень

этого элемента в речной воде продолжал сохраняться и в весенний период ( $22,84 \pm 0,93$  мг/дм<sup>3</sup>; 4,57 ПДК). В летний и осенний периоды концентрация цинка снизилась в 2,0~2,5 раза и составила  $10,84 \pm 0,24$  и  $12,12 \pm 0,34$  мг/дм<sup>3</sup> соответственно по сезонам года.

Высокая массовая концентрация железа (6,2 ПДК) выявлена в зимний период. Концентрация марганца была также выше допустимого уровня, однако следует отметить, что если зимой и весной она составила 2,9 и 3,2 ПДК соответственно, то в летний и осенний периоды исследований — значительно снизилась до 1,5 и 1,2 ПДК соответственно.

В наших исследованиях в речной воде установлено превышение ПДК для открытых водоемов по никелю в зимний период в 1,9 раза; весенний — в 2,8 и осенний — в 2,5 раза. Летом концентрация никеля в исследованной воде снизилась и достигла  $0,12 \pm 0,005$  мг/дм<sup>3</sup> при ПДК — 0,1 мг/дм<sup>3</sup>.

Достаточно высокая концентрация кадмия установлена в речной воде — 0,0035; 0,0022; 0,0014 и 0,0013 мг/л соответственно в зимний, весенний, летний и осенний периоды наблюдения. Максимальная концентрация этого элемента зарегистрирована зимой — 3,5 ПДК и в начале весны — 2,2 ПДК. Концентрация свинца превышала допустимый уровень весной в 5,0; зимой — в 4,0; летом — в 3,0; осенью — в 2,6 раза. Высокая концентрация тяжелых металлов послужила основанием для определения эффекта их суммарного воздействия (максимум зимой — 5,34 и минимум летом — 2,14).

Для расчета индекса загрязняющих веществ (ИЗВ) нами выбраны следующие показатели: рН, содержание растворенного кислорода, БПК<sub>5</sub>. Из числа лимитирующих показателей гидрохимического мониторинга были выбраны нитриты, аммонийный азот, нефтепродукты и железо. Расчеты комплексного показателя качества (ИЗВ) показали,

что речная вода в зимний и весенний период характеризуется как «грязная» и соответствует 5-му классу качества. Летом и осенью вода «загрязненная» (4-й класс) и «умеренно загрязненная» (3-й класс) соответственно.

*Содержание тяжелых металлов в донных отложениях и водорослях.* Содержание марганца в донных отложениях составило  $176,52 \pm 8,06$  мг/кг, что превышает кларковые значения данного элемента в литосфере в 160,47 раза. Сравнение полученных результатов с допустимыми значениями марганца для пресноводных донных отложений, не подверженных антропогенному загрязнению, показали превышение в 235,36 раза. Достаточно высоким является коэффициент обогащения донных осадков железом, содержание которого в донных отложениях составило  $516,90 \pm 2,59$  мг/кг. Расчет коэффициента обогащения донных отложений железом по кларку литосферы составил 11,11, а по пресноводным донным отложениям, не подверженным антропогенному загрязнению, — 11,88.

Коэффициенты обогащения в донных отложениях цинком и кобальтом, рассчитанные по кларку литосферы и допустимым уровням содержания этого элемента в пресноводных донных отложениях, составили 0,53; 0,14 и 0,40 соответственно; по свинцу, никелю и меди — 0,24; 0,16; 0,14 и 0,13; 0,16; 0,15 соответственно, что свидетельствует о хорошей мобильности данных элементов. Таким образом, донные отложения в речной экосистеме обогащены металлами с переменной валентностью, в первую очередь марганцем и железом.

Содержание микроэлементов — кобальта, никеля, марганца, меди и цинка — наряду с биогенными элементами существенно влияет на развитие живых организмов в водоемах, особенно растительных, являющихся первым звеном в цепи органической жизни.

Данные, полученные при изучении элементного состава водорослей, свидетельствуют о значительном накоплении тяжелых металлов и указывают прежде всего на наличие их биодоступных форм в среде, которая может оказать или оказывает токсическое действие на водные организмы.

В пробах водорослей абсолютное содержание тяжелых металлов подчиняется следующей закономерности:  $Cd < Si < Pb < Co < Ni < Zn < Fe < Cr < Mn$ . Превышение ДОК было установлено для хрома при коэффициенте биологического поглощения 1,598 и для марганца, коэффициент биологического поглощения которого составил 2,108. Содержание никеля при нормативном уровне 1—3 мг/кг составило  $1,37 \pm 0,06$  мг/кг. Повышенные уровни марганца, меди и никеля в речной воде, вероятно, можно объяснить и тем, что в водных экосистемах, подверженных деятельности тепловых электростанций, именно эти элементы являются приоритетными загрязнителями.

*Содержание тяжелых металлов в организме рыб различных семейств.* Водная среда, физические и химические свойства воды оказывают сильное влияние на обитающие в водоеме живые организмы. Тесно связанные со средой обитания водные организмы поглощают из нее доступные химические элементы, дающие растворимые соединения, или активно превращают нерастворимые в доступные соединения. При этом в пищевых цепях водоемов происходят одновременно два процесса — уменьшение количества одних элементов и концентрация в отдельных звеньях цепей других [13].

С учетом вышеизложенного нами, наряду с определением органолептических и гидрохимических показателей речной воды, содержания в донных отложениях и водорослях было проведено изучение распределения тяжелых металлов в органах и тканях рыб четырех семейств: окуневые (окунь,

ерш, судак); карповые (плотва, пескарь, верховка); щуковые (щука); сомовые (сом). Наибольшее содержание цинка в мышечной ткани наблюдалось у рыб семейства сомовые (род сом) —  $20,84 \pm 0,07$  мг/кг и семейства щуковые (род щука) —  $19,68 \pm 0,32$  мг/кг. При этом наблюдались достоверные различия между отдельными представителями этого семейства ( $P < 0,001$ ). Несколько меньшее содержание цинка по сравнению с сомовыми и щуковыми было выявлено у представителей семейства карповые. Так, у верховки его содержание было  $16,61 \pm 0,22$  мг/кг, что в 1,5 и 1,9 раза меньше, чем у пескаря и плотвы. По-видимому, это объясняется видовыми особенностями внутри семейства ( $P < 0,001$ ).

Наименьшее содержание цинка в мышечной ткани зарегистрировано у окуня ( $5,80 \pm 0,21$  мг/кг). При этом также необходимо отметить существенные различия в содержании цинка у представителей семейства окуневые. Так, у ерша и судака содержание цинка в мышечной ткани было на 52, 59 и 104,66% выше по сравнению с окунем. Наибольшее содержание железа в мышечной ткани наблюдалось у рода щуки семейства щуковые ( $22,72 \pm 0,23$  мг/кг), что почти в 2 раза выше, чем у семейства сомовые.

Самые высокие концентрации меди в мышцах были выявлены у верховки и пескаря, составившие  $0,31 \pm 0,01$  и  $0,19 \times 0,03$  мг/кг соответственно, что в 2,1 раза больше, чем у судака семейства окуневые и семейства сомовые.

Достаточно высокое содержание кобальта в мышцах установлено у ерша, судака, плотвы, щуки и сома, у которых этот показатель варьировал от  $0,33 \pm 0,02$  до  $0,38 \pm 0,07$  мг/кг.

У всех изученных представителей семейства карповые, а также у окуня в мышечной ткани выявлены высокие концентрации марганца, составившие от  $0,71 \pm 0,01$  до  $0,82 \pm 0,05$  мг/кг у карповых и  $0,94 \pm 0,06$  мг/кг — у окуня. Ярко выраженные различия в содер-

жании марганца нами установлены внутри семейства окуневые. Так, если у судака и щуки показатель составил  $0,37 \pm 0,01$  мг/кг, то у ерша он оказался выше на 37,84%, а у окуня в мышцах достиг  $0,94 \pm 0,06$  мг/кг.

Мышечная ткань рыб хорошо аккумулирует элементы с антиметаболической ролью. Максимальная концентрация свинца наблюдалась у щуки —  $1,35 \pm 0,03$  мг/кг, что на 64,0% превысило ДОК. Такая же картина в накоплении свинца была выявлена у судака и сома, где превышение ДОК составило в среднем 74,79%. Содержание кадмия, обладающего канцерогенными, мутагенными свойствами и эмбриотоксическим действием, в мышечной ткани рыб всех изучаемых семейств составило в среднем  $0,05 \pm 0,01$  мг/кг. Максимальная концентрация никеля была установлена у рыб-хищников, а именно у щуки, окуня и судака, составившая в среднем  $0,34 \pm 0,02$  мг/кг, а минимальная концентрация наблюдалась у рыб семейств сомовые и карповые, в среднем  $0,16 \pm 0,04$  мг/кг.

В жабрах рыб содержание железа варьировало в пределах от 3,01 до 6,47 мг/кг. Высокая концентрация железа наблюдалась у представителей семейства окуневые (судак, окунь, ерш), карповые (пескарь, верховка, плотва), сомовые (сом), щуковые (щука). Содержание кобальта в жабрах рыб во всех изучаемых семействах было практически в одинаковых пределах, но наиболее высокие показатели отмечены у семейства карповых, а именно у плотвы и пескаря — соответственно  $1,29 \pm 0,04$  и  $1,04 \pm 1,01$  мг/кг, что на 23,1% больше по сравнению с верховкой ( $P < 0,001$ ).

Значительная тенденция к накоплению свинца в жабрах отмечена у рыб-хищников, а именно у щуки —  $1,76 \pm 0,035$  мг/кг, судака —  $1,57 \pm 0,01$  и окуня —  $0,58 \pm 0,25$  мг/кг соответственно. Наибольший уровень накопления кадмия в жабрах был отмечен у рыб

семейства сомовые —  $0,70 \pm 0,57$  мг/кг, что превысило допустимый уровень в 3,8 раза. Наиболее высокая концентрация никеля в жабрах обнаружена у представителей семейства карповые у рода верховка и рода плотва —  $1,03 \pm 0,04$  и  $0,96 \pm 0,10$  мг/кг соответственно и превысила ДОК в 2,06 и 1,92 раза.

В чешуе рыб максимальная концентрация цинка была выявлена у рода верховка (семейство карповые) —  $23,85 \pm 0,03$  мг/кг, а минимальная — у пескаря —  $13,27 \pm 0,21$  мг/кг. У ерша и судака содержание цинка в чешуе составило  $18,33 \pm 2,12$  и  $15,63 \pm 0,01$  мг/кг соответственно. У верховки также установлено высокое содержание железа в чешуе —  $29,86 \pm 0,37$  мг/кг. У судака и окуня уровень содержания этого элемента в чешуе составил  $7,71 \pm 0,03$  и  $1,06 \pm 0,02$  мг/кг соответственно. Менее значимыми были показатели у рода пескарь и рода щука.

Установленная высокая концентрация меди в чешуе, по-видимому, указывает на тот факт, что покровные ткани рыб, особенно семейства карповые, хорошо депонируют этот металл, а возможно и принимают определенное участие в обмене меди между рыбой и средой обитания [12, 14].

Максимальные показатели содержания кобальта в чешуе рыб выявлены у плотвы и ерша —  $1,03 \pm 0,03$  и  $0,97 \pm 0,04$  мг/кг соответственно, что практически более чем в 6 раз меньше, чем у сома —  $0,17 \pm 0,01$  мг/кг. У судака и верховки изучаемые показатели составили  $0,19 \pm 0,01$  и  $0,36 \pm 0,01$  мг/кг соответственно.

Высокая тенденция к накоплению марганца в чешуе была выявлена у рыб семейства окуневые, где этот показатель составил у ерша  $2,62 \pm 0,36$  мг/кг, у окуня —  $2,81 \pm 0,11$ , у судака —  $0,35 \pm 0,01$  мг/кг. В сравнении с карповыми было выявлено превышение содержания этого элемента: у плотвы — в 7,88, а у верховки — в 5,54

раза. У щуки содержание марганца в чешуе было минимальным и составило  $0,48 \pm 0,01$  мг/кг.

Самые высокие показатели свинца в чешуе обнаружены у рыб семейства карповые, где его содержание у пескаря составило  $1,56 \pm 0,01$  мг/кг, а у верховки —  $0,70 \pm 0,01$ , что на 44,8% превышает допустимые уровни остаточного количества. Несколько ниже значения изучаемого показателя были у представителей рыб семейства окуневые. Так, у судака содержание свинца составило  $0,26 \pm 0,01$  мг/кг, у окуня —  $0,38 \pm 0,02$ , у ерша —  $1,30 \pm 0,39$  мг/кг. Следует отметить, что различия в содержании свинца в чешуе внутри этого семейства носили достоверный характер. У представителей семейства щуковые этот показатель составил  $1,46 \pm 0,07$  мг/кг, что на 68,4% превысило ДОК.

Максимальное содержание кадмия в чешуе было установлено для ерша и верховки и в среднем  $0,14 \pm 0,01$  мг/кг. Следует отметить, что в содержании кадмия больших расхождений не наблюдалось, оно варьировало от  $0,09 \pm 0,01$  до  $0,15 \pm 0,01$  мг/кг и находилось в пределах ДОК.

Максимальная аккумуляция никеля в чешуе была зафиксирована у пескаря и оставила  $1,01 \pm 0,04$  мг/кг. У плотвы содержание этого элемента составило  $0,90 \pm 0,02$  мг/кг, а у верховки было в 2,4 раза ниже, чем у пескаря ( $P < 0,001$ ). В семействе окуневые этот показатель составил у окуня  $0,73 \pm 0,06$  и у ерша —  $0,65 \pm 0,05$  мг/кг.

В плавниках максимальное содержание цинка было выявлено у семейства сомовые и щуковые —  $26,23 \pm 0,01$  и  $26,27 \pm 0,66$  мг/кг соответственно. У представителей семейства карповые (род верховка) этот показатель составил  $22,49 \pm 0,20$  мг/кг, у плотвы —  $18,09 \pm 0,63$ , у пескаря —  $16,44 \pm 0,12$  мг/кг. Минимальное содержание цинка зарегистрировано у представителей семейства окуневые, где содержание цин-

ка составило у ерша  $14,90 \pm 0,88$  мг/кг, что в 1,8 раза меньше, чем у представителей семейства сомовые ( $P < 0,001$ ).

Наибольший уровень накопления железа был отмечен у верховки и пескаря —  $17,38 \pm 0,15$  и  $15,20 \pm 0,12$  мг/кг соответственно. У окуня этот показатель составил  $5,94 \pm 0,19$ , у судака —  $3,78 \pm 0,02$  мг/кг, что в 2,04 и 3,2 раза больше, чем у ерша из этого семейства.

По сравнению со всеми изучаемыми химическими элементами наименьшее содержание меди установлено в плавниках судака —  $0,13 \pm 0,01$  мг/кг. Если сравнить результаты исследований по семействам рыб, то самые высокие концентрации меди нами были установлены в плавниках щуки —  $0,28 \pm 0,03$  мг/кг. Наименьшая концентрация меди установлены в плавниках судака —  $0,13 \pm 0,01$  мг/кг. Высокое содержание кобальта выявлено у окуня, —  $1,20 \pm 0,03$  мг/кг, а минимальное у пескаря —  $0,77 \pm 0,05$  мг/кг. Содержание свинца в плавниках судака составило  $2,14 \pm 0,05$  мг/кг и в 2,14 раза превысило ДОК. У остальных представителей семейства не было отмечено определенных различий, и значения колебались от  $1,05 \pm 0,34$  до  $1,52 \pm 0,08$  мг/кг соответственно.

Содержание кадмия в плавниках рыб во всех изучаемых семействах составило  $0,13 \pm 0,01$  мг/кг и было практически на одном уровне, за исключением ерша, у которого содержание кадмия составило  $0,16 \pm 0,02$  мг/кг.

Высокий показатель содержания никеля в плавниках выявлен у плотвы (семейство карповые), он составил  $1,06 \pm 0,17$  мг/кг, что в 1,6 и 7,5 раза больше по сравнению с пескарем из этого же семейства ( $P < 0,001$ ). Минимальное содержание никеля установлено нами в плавниках у ерша —  $0,56 \pm 0,04$  мг/кг, что в 1,5 раза ниже, чем у окуня и судака (семейства окуневые), где не было выявлено достоверных различий.

В костной ткани максимальное со-

держание цинка было выявлено у пескаря —  $21,98 \pm 0,44$  мг/кг, что в 1,1 и 1,3 раза больше, чем у верховки и плотвы ( $P < 0,01$ ) — соответственно  $19,34 \pm 0,37$  и  $16,70 \pm 0,09$  мг/кг. Необходимо также отметить, что самое низкое содержание цинка среди указанных семейств выявлено у рыб семейства окуневые. Внутри семейства максимальное значение изучаемого показателя обнаружено у окуня —  $16,18 \pm 0,42$  мг/кг, что в 1,1 раза больше, чем у ерша, а минимальное — у судака —  $0,53 \pm 0,27$  мг/кг ( $P < 0,001$ ).

Наибольший уровень содержания железа в костной ткани был установлен у окуня и верховки —  $12,82 \pm 1,57$  и  $12,82 \pm 0,23$  мг/кг соответственно. Практически такое же содержание железа было установлено в костной ткани пескаря —  $12,77 \pm 0,39$  мг/кг. Низкая концентрация железа была установлена в костной ткани щуки, плотвы и судака —  $2,65 \pm 0,58$  мг/кг,  $2,37 \pm 1,09$  и  $2,18 \pm 0,02$  мг/кг соответственно ( $P < 0,001$ ).

Высокое содержание меди в костной ткани выявлено у рыб семейства карповые. Так, у плотвы, пескаря и верховки содержание изучаемого химического элемента в костной ткани составило  $0,19 \pm 0,06$ ,  $0,18 \pm 0,01$  и  $0,18 \pm 0,11$  мг/кг соответственно. Наиболее высокое содержание кобальта в костной ткани наблюдалось у окуня ( $1,37 \pm 0,08$  мг/кг), щуки ( $1,12 \pm 0,01$  мг/кг) и сома ( $1,01 \pm 0,03$  мг/кг), что превысило ДОК в 2,02; 2,24 и 2,74 раза. Необходимо отметить, что во всех изучаемых семействах рыб выявлено превышение ДОК в костной ткани кобальта: у пескаря в 1,38, у ерша — в 1,74 и у судака — в 1,8 раза. Содержание марганца во всех изучаемых семействах рыб находилось практически в одинаковых пределах и варьировало от  $1,84 \pm 0,25$  до  $3,51 \pm 0,18$  мг/кг.

Значительная тенденция к накоплению свинца в костной ткани отмечена у щуки. Концентрация этого экотоксиканта составила  $2,01 \pm 0,05$  мг/кг и

превысила ДОК в 2,01 раза. Несколько ниже значения изучаемого показателя были у сома и судака —  $1,90 \pm 0,01$  и  $1,89 \pm 0,05$  мг/кг соответственно, при допустимой концентрации 1,0 мг/кг. Присутствие кадмия в костной ткани установлено у всех изучаемых рыб. При этом надо отметить, что у пескаря наблюдалось превышение ДОК по кадмию в 1,15 раза. В остальных изученных семействах (щуковые, сомовые) по содержанию кадмия в костной ткани не было выявлено достоверных различий и этот показатель составил в среднем  $0,17 \pm 0,01$  мг/кг. При сравнении полученных результатов необходимо отметить высокое содержание никеля в костной ткани окуня —  $1,47 \pm 0,08$  мг/кг, что превышает ДОК в 2,94 раза, при достоверных различиях в сопоставлении с судаком ( $P < 0,001$ ).

В гонадах максимальная аккумуляция цинка была выявлена у рыб семейства карповые и щуковые — у пескаря  $22,80 \pm 0,25$ , у щуки —  $30,73 \pm 0,14$  мг/кг соответственно. Низкое содержание цинка в гонадах отмечено у судака —  $6,39 \pm 0,03$  мг/кг, что в 4,8 раза больше, чем у рода щуки (Esocidae)  $30,73 \pm 0,14$  мг/кг ( $P < 0,001$ ). Наибольший уровень накопления железа отмечен в гонадах верховки ( $34,55 \pm 0,19$  мг/кг), что превысило ДОК в 1,15 раза. Самое низкое содержание железа наблюдалось у рыб семейства сомовые. Так, у сома этот показатель составил  $5,63 \pm 0,01$  мг/кг, а у щуки содержание железа по сравнению с сомом было в 1,86 раза больше. Самая высокая концентрация меди в гонадах изучаемых рыб установлена у рыб семейства карповые (род пескарь), составившая  $0,21 \pm 0,01$  мг/кг. У ерша и верховки содержание меди в гонадах составило  $0,16 \pm 0,01$  мг/кг и  $0,15 \pm 0,01$  мг/кг соответственно. Низкая концентрация меди наблюдалась у судака и сома —  $0,05 \pm 0,01$  и  $0,06 \pm 0,11$  мг/кг соответственно.

У представителей семейства карповые максимальное содержание мар-

ганца было выявлено в гонадах у верховки —  $10,18 \pm 0,01$  мг/кг. У плотвы содержание марганца находилось на уровне  $4,98 \pm 0,03$  мг/кг, а у пескаря —  $3,72 \pm 0,22$  мг/кг.

Наибольшее содержание свинца в гонадах было выявлено у рыб семейства сомовые и щуковые: у верховки и щуки —  $0,30 \pm 0,01$ , у сома —  $0,32 \pm 0,02$  мг/кг. При этом у пескаря и верховки из семейства карповые содержание свинца в гонадах составило  $0,28 \pm 0,05$  и  $0,30 \pm 0,01$  мг/кг соответственно.

У окуня концентрация свинца составила  $0,05 \pm 0,01$  мг/кг, что в среднем, в 2,7 раза ниже по сравнению с другими представителями этого семейства.

Необходимо отметить, что во всех изучаемых семействах рыб установлено наличие кадмия в гонадах, составившее в среднем  $0,05 \pm 0,01$  мг/кг, что не превысило рекомендуемого уровня допустимых остаточных концентраций. Высокое содержание никеля в гонадах было установлено у окуня и ерша — в среднем  $0,15 \pm 0,01$  мг/кг. Минимальное содержание никеля отмечено у рыб семейства щуковые (род щука) —  $0,06 \pm 0,01$  мг/кг, что соответствовало допустимым концентрациям.

Для подтверждения выявленных особенностей в накоплении тяжелых металлов органами и тканями рыб разных семейств нами был проведен многофакторный дисперсионный анализ.

Результаты многофакторного дисперсионного анализа показали, что из всех металлов наибольшее различие между видами с учетом органов и тканей обнаружено по цинку, магнию, железу и марганцу. Распределение кобальта, никеля, кадмия и свинца наблюдалось в большей степени именно в гонадах, что, вероятно, объясняется внутривидовыми особенностями рыб. Никель, кобальт, кадмий и свинец, как самостоятельный кластер металлов, в ходе проводимого исследования объединили в единую группу ксенобио-

тиков со схожими характеристиками изменчивости.

Таким образом, в результате выбросов филиала ОАО «ОГК-2» — Троицкая ГРЭС идет формирование природно-техногенной биогеохимической провинции с избытком свинца, никеля, кадмия, железа, марганца и недостатком меди и цинка. Проведенные исследования позволили установить, что загрязнение реки Уй тяжелыми металлами, поступающими преимущественно с очистных сооружений, канализаций и филиала ОАО «ОГК-2» — Троицкая ГРЭС, ЖБИ оказывает негативное воздействие на гидрохимический режим водной среды, что влияет на элементарный состав донных отложений, водорослей и гидробионтов.

### Выводы

1. Во все сезоны года из контролируемых гидрохимических показателей превышают ПДК взвешенные и оседающие вещества, изменяющиеся в интервалах 9,11-15,92 и 5,97-7,93 мг/дм<sup>3</sup> при снижении прозрачности речной воды до 13,50±0,42 см весной. На фоне изменения рН в кислую сторону концентрация азота аммония в зимний и весенний периоды составляет 12,24 и 15,35 ПДК соответственно; азота нитритов — 7,38 и 9,12 ПДК в весенний и осенний периоды. Максимальные концентрации фосфатов установлены летом — 0,88±0,03 мг/дм<sup>3</sup> и зимой — 0,61±0,02 мг/дм<sup>3</sup>. Преимущественное загрязнение речной воды поверхностным стоком во время паводков влияло на динамику обобщенных гидрохимических показателей: весной ПО воды составила 10,80±0,43 мг/дм<sup>3</sup>; ВПК — 8,44 + 0,36 мг/дм<sup>3</sup>, ХПК — 35,15±0,16 мг/дм<sup>3</sup> при сохранении их высоких значений в летний период. Концентрация растворенного кислорода варьировала в интервале 4,25±0,25 мг/дм<sup>3</sup> зимой и 5,89±0,25 мг/дм<sup>3</sup> летом.

2. Река Уй подвержена значительному антропогенному воздействию. Наибольшие значения концентрации нефтепродуктов специфических гидрохи-

мических показателей отмечены весной и летом (0,98±0,09 и 0,84±0,02 мг/дм<sup>3</sup> соответственно), СПАВ — весной (0,70±0,008 мг/дм<sup>3</sup>). Максимальное содержание марганца составляет 5,1 ПДК (весной); меди — 6,42 ПДК (зимой); кадмия — 3,5 ПДК (зимой) и 2,2 ПДК (весной).

3. Донные отложения в речной экосистеме обогащены металлами с переменной валентностью, в первую очередь марганцем и железом, коэффициенты обогащения которых составили соответственно 160,47 и 11,11. Содержание типичных экотоксикантов — кадмия, свинца и никеля — составило 0,26±0,003; 3,90±0,19; 0,26±0,003 мг/кг, при коэффициентах обогащения 2,0; 0,24 и 0,16 соответственно.

4. В пробах водорослей абсолютное содержание тяжелых металлов подчиняется следующей закономерности: Cd < Си < РЬ < Со < Ni < Zn < Fe < Cr < Mn, при коэффициентах биологического поглощения для марганца 2,108; хрома — 1,598; никеля — 0,456; кобальта — 0,40; железа и меди — 0,018 и цинка — 0,017.

5. Наибольшее абсолютное содержание тяжелых металлов обнаружено в костной ткани и гонадах рыб. Максимальное содержание кобальта в костной ткани характерно для окуня (1,37±0,08 мг/кг; 2,02 ДОК); щуки (1,12±0,01 мг/кг; 2,24 ДОК) и сома (1,01±0,03 мг/кг; 2,74 ДОК), свинца — для щуки (2,01±0,05 мг/кг; 2,01 ДОК); никеля — для окуня (1,47±0,08 мг/кг; 2,94 ДОК); железа — для верховки и окуня (12,82±0,23; 12,82±1,57 мг/кг). Максимальное содержание цинка в гонадах для щуки составило 30,73±0,14 мг/кг, плотвы — 22,80±0,25 мг/кг, верховки — 21,80±0,40 мг/кг; меди — для пескаря (0,21 ±0,01 мг/кг); свинца — для верховки и щуки (0,30±0,01 мг/кг); никеля — для окуня и ерша (0,15±0,05; 0,15±0,01 мг/кг).

6. Наименьшее содержание тяжелых металлов обнаружено в мышцах и чешуе рыб. Минимальное содержание цинка в мышечной ткани характерно для окуня (5,80±0,21 мг/кг) и ерша (8,85±0,30 мг/кг); меди — для судака (0,13±0,01 мг/кг);

марганца — для сома ( $0,45 \pm 0,05$  мг/кг); никеля — для ерша ( $0,13 \pm 0,05$  мг/кг). Низкое содержание цинка в чешуе выявлено у щуки ( $3,56 \pm 0,44$  мг/кг), меди — у сома ( $0,05 \pm 0,01$  мг/кг), марганца — у судака ( $0,35 \pm 0,01$  мг/кг), кадмия — у пескаря ( $0,10 \pm 0,01$  мг/кг).

Содержание тяжелых металлов в органах и тканях рыб различных семейств в ряде случаев превышает гигиенические нормативы, установленные для пищевых продуктов. Превышение допустимой остаточной концентрации в 1,26-1,45 раза по свинцу в мышечной ткани выявлено у сома, судака, щуки. В жабрах у верховки, судака, окуня, пескаря, ерша и щуки содержится кобальта 1,68-3,52 ДОК; у судака и щуки — свинца (1,57—1,76 ДОК); у окуня — кадмия (1,05 ДОК); у пескаря, сома, окуня, ерша, плотвы и верховки — никеля (1,28-2,06 ДОК). Содержание кобальта в чешуе у верховки, судака, окуня, пескаря, ерша и щуки составило 1,68-2,58 ДОК; у ерша, щуки

и пескаря — свинца (1,30-1,56 ДОК); щуки, ерша, окуня, плотвы, сома и пескаря — никеля (1,16-2,02 ДОК). В плавниках у всех изучаемых рыб содержание кобальта превысило ДОК в 1,54—2,40 раза, свинца — в 1,05-2,14; никеля — в 1,12-2,12 раза, а в костной ткани — в 1,38-2,74; 1,02-2,01 и 1,02-2,94 раза соответственно.

Результаты трехфакторного дисперсионного анализа показали, что в зоне филиала ОАО «ОГК-2» — Троицкая ГРЭС и преимущественно в результате ее выбросов идет формирование природно-техногенной биогеохимической провинции с повышенным содержанием свинца, никеля, кадмия, меди, цинка, железа и марганца. При этом многомерное оптимальное шкалирование по методу CatPCA позволило выявить, что содержание никеля, кадмия и свинца не зависит от видовой принадлежности рыб, и эти элементы являются токсикантами средового происхождения.

### Библиографический список

1. Алимов А.Ф. Основные положения теории функционирования водных экосистем / А.Ф. Алимов // Гидробиологический журнал, 1990. Т. 26. № 6. С. 3-12.
2. Леонов А.М. Водоохранные системы в сельском хозяйстве / А.М. Асонов, О.Р. Ильясов. Екатеринбург: УрГУПС, 2003.
3. Берман Ш.А. Микроэлементы в организме рыб и птиц / Ш.А. Берман, И.К. Гозит. Рига, 1968. С. 5-18.
4. Бессонов Н.М. Рыбохозяйственная гидрохимия / Н.М. Бессонов, Ю.А. Привезенцев. М.: Агропромиздат, 1987.
5. Большаков В.Н. Экологический подход к проблемам развития крупного промышленного региона (на примере Урала) / В.Н. Большаков // Продовольственная безопасность XXI век: Эколого-экономические аспекты: Сб. научн. тр. / УрГСХА, 2000. Т. 1. С. 29-45.
6. Воробьев В.И. Микроэлементы и их применение в рыбоводстве / В.И. Воробьев. М.: Пищевая промышленность, 1979.
7. Грибовский Ю.Г. Биогеохимические провинции Урала и проблемы техногенеза / Г.П. Грибовский, Ю.Г. Грибовский, НА. Плохих // Техногенез и биогеохимическая эволюция таксонов биосферы. М.: Наука, 2003. С. 174-187.
8. Михеев Н.Н. Обеспечение населения России питьевой водой / Н.Н. Михеев, С.В. Яковлев, А.П. Нечаев, Е.В. Мясникова // Водоснабжение и санитарная техника. М., 1997. № 4. С. 2-4.
9. Моисеенко Т.И. Рассеянные элементы в поверхностных водах суши / Т.И. Моисеенко, Л.П. Кудрявцева, НА. Гашкина. М.: Наука, 2006. С. 115-217.
10. Попов, П.А. Оценка экологического состояния водоемов методами ихтиоиндикации: Автореф. канд. дис. Томск, 2003.
11. Трапезников А.В. Радиоэкологическая ситуация в Уральском регионе / А.В. Трапезников, В.Н. Трапезникова // Научные основы профилактики и лечения болезней животных. Екатеринбург, 2005. С. 563-566.

12. *Heath A.G.* Water pollution and fish physiology. L.: Lewis, 2002.

13. *Loska K.* Use of enrichment, and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik water reservoir Poland / K. Loska, J. Cebula, J. Pelczar et al. // *Water Air Soil Pollut.*, 1997. Vol. 95. № 1-4. P. 347-365.

14. *Sloman K.A., Scott G.R., Zhongyu D.* Cadmium affects the social behavior rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* // *Aquat. Toxicol.*, 2003. Vol. 65. P. 171-185.

15. *Tropin I.V., Radzinskaya N.V., Voskoboinikov G.M.* Assessment of salinity stress upon littoral fucoids: physiological and cytological approaches // *Phycologia*, 2001. Vol. 40 (4) — Supplement.

*Рецензент* — д. с.-х. н. В.И. Глазко

#### SUMMARY

The research deals with heavy metals cumulation and their distribution in organs and tissues of fish various families which are subject to man's impact. It has been discovered that heavy metals content in organs and tissues of fish exceeds allowable health standards for foodstuffs. Of the number of controlled hydrochemical indices in all seasons suspended and precipitating substances exceed MAC changing in the range 9.11-15.92 and 5.97-7.93 mg/dm<sup>3</sup> by decrease in river water transparency up to 13.5H—0.42 in spring.

**Key words:** fish tissues, heavy metals, water samples, bed silt, hydrochemical indices, health standards.