

Научная статья
УДК 639.216.4:591.1
<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-4-135-142>
EDN CUEZIE

Содержание тяжелых металлов в мышечной ткани судака *Sander lucioperca* в разных плесах Рыбинского водохранилища

*Александра Александровна Паюта**, *Екатерина Александровна Флерова*,
Юлия Владимировна Зайцева

Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова,
*Ярославль, Россия, a.payuta@mail.ru**

Аннотация. Рыбинское водохранилище – один из крупнейших искусственных водоемов России, Шекснинский плес водохранилища подвергается наибольшему антропогенному воздействию в связи с поступлением в него сточных вод с предприятий Череповецкого комплекса. Тяжелые металлы, поступающие в водохранилище, могут накапливаться в организме, в том числе в хищниках – последнем звене трофических цепей водоема. Цель работы: установить концентрацию тяжелых металлов в мышцах судака *Sander lucioperca* в Рыбинском водохранилище и определить ее соответствие российским и международным стандартам. Рыб отлавливали в нагульный период тралом в Шекснинском и Волжском плесах, измеряли, рассчитывали коэффициенты упитанности по Фульгону и Кларк. В мышечной ткани определяли содержание Cd, Cr, Pb, Cu, Mn, Fe, Al, Co, Ni, V. Упитанность особей судака из Рыбинского водохранилища, вне зависимости от уровня локального антропогенного загрязнения, соответствовала средним значениям, характерным данному виду. В мышцах особей содержание никеля и ванадия было ниже предела обнаружения. В среднем в ткани содержалось в мг/кг влажного веса Cd 0,004, Cr 0,095, Pb 0,028, Cu 0,734, Mn 0,205, Fe 4,986, Al 12,538, Co 0,002. Концентрация Fe, Al, Mn в мышечной ткани судака из Шекснинского плеса достоверно превышала данные показатели Fe, Al, Mn у особей Волжского плеса. Потребление мяса судака из Рыбинского водохранилища не является потенциально опасным для здоровья человека, т. к. концентрации тяжелых металлов в мышечной ткани исследованных особей не превышают допустимые уровни элементов по российским и международным стандартам.

Ключевые слова: Рыбинское водохранилище, судак *Sander lucioperca*, мышечная ткань, содержание тяжелых металлов, концентрация, коэффициент упитанности

Благодарности: работа выполнена при поддержке Государственного задания НИР № 0856-2020-0008 Министерства науки и высшего образования РФ на период 2020–2022 гг.

Для цитирования: Паюта А. А., Флерова Е. А., Зайцева Ю. В. Содержание тяжелых металлов в мышечной ткани судака *Sander lucioperca* в разных плесах Рыбинского водохранилища // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2022. № 4. С. 135–142. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-4-135-142>. EDN CUEZIE.

Original article

Heavy metal content in muscle tissue of pikeperch *Sander lucioperca* in different reaches of Rybinsk Reservoir

*Aleksandra A. Payuta**, *Ekaterina A. Flerova*, *Yuliya V. Zaitseva*

P. G. Demidov Yaroslavl State University,
*Yaroslavl, Russia, a.payuta@mail.ru**

Abstract. The Rybinsk Reservoir is one of the largest artificial reservoirs in Russia. The Sheksna reach of the Reservoir is worst anthropogenically affected due to the waste waters of the Cherepovets industrial plants. Heavy metals entering the Reservoir can accumulate in the body of fish including the predators – the last link in the trophic chains of the Reservoir. Purpose of the study is to register the concentration of heavy metals in the muscles of the pikeperch *Sander lucioperca* in the Rybinsk Reservoir and to define its compliance with the Russian and international standards. The fish were caught in the feeding period with a trawl in the Sheksna and Volzhsky reaches, measured, and fatness coefficients were calculated according to Fulton and Clark. The content of Cd, Cr, Pb, Cu, Mn, Fe, Al, Co, Ni, V was

determined in the fish muscle tissues. Fatness of pikeperch from the Rybinsk Reservoir, regardless of the level of the local anthropogenic pollution, corresponded to the mean values typical to this species. In the pikeperch muscles the content of nickel and vanadium was below the detection limit. On average, the tissues contained Cd 0.004, Cr 0.095, Pb 0.028, Cu 0.734, Mn 0.205, Fe 4.986, Al 12.538, Co 0.002 in mg/kg wet weight. Concentration of Fe, Al, Mn in the muscle tissues of pikeperch from the Sheksna reach significantly exceeded the values of Fe, Al, Mn in the muscle tissue of pikeperch in the Volga reach. Consumption of pikeperch meat from the Rybinsk Reservoir is not potentially hazardous to human health, since concentrations of heavy metals in the muscle tissues of the studied species do not exceed the permissible levels of elements, according to the Russian and international standards.

Keywords: Rybinsk Reservoir, pikeperch *Sander lucioperca*, muscle tissue, heavy metal content, concentration, fatness factor

Acknowledgment: the study was carried out under support by State Assignment Research No. 0856-2020-0008 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the period 2020-2022.

For citation: Payuta A. A., Flerova E. A., Zaitseva Yu. V. Heavy metal content in muscle tissue of pikeperch *Sander lucioperca* in different reaches of Rybinsk Reservoir. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*. 2022;4:135-142. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-4-135-142>. EDN CUEZIE.

Введение

Рыбинское водохранилище является одним из крупнейших искусственных водоемов России, его площадь составляет 4 550 км². Водоохранилище располагается на территории Ярославской, Тверской и Вологодской областей [1]. Выделяют 4 плеса Рыбинского водохранилища: Волжский, Моложский, Главный, Шекснинский. Последний характеризуется повышенным содержанием тяжелых металлов в воде и донных отложениях. Причина этого – поступление сточных вод с предприятий химической промышленности и черной металлургии промышленного Череповецкого комплекса [2].

Тяжелые металлы бывают биогенными, необходимыми для жизнедеятельности организма, и токсичными, приводящими к его отравлению или гибели. Они могут замещать важные для жизнедеятельности минеральные вещества и блокировать их биологические функции, влиять на физиолого-биохимические показатели рыб [3]. Индивидуальная потребность животных в тяжелых металлах очень мала, поэтому любое фоновое изменение их содержания из-за избыточного поступления из внешней среды приводит к различным токсическим воздействиям на живых существ [4].

В организм рыб тяжелые металлы могут попадать и накапливаться путем хемосорбции, механического захвата взвешенных частиц, поглощения жабрами и в процессе питания гидробионтов [3, 5]. Последний вариант считается наиболее опасным, т. к. токсические свойства веществ могут проявляться не только у добычи, но и у хищников по пищевым сетям [6–9]. Накапливаясь в тканях рыб, тяжелые металлы представляют потенциальную угрозу для здоровья человека [7].

На Рыбинском водохранилище проводились исследования, посвященные преимущественно изучению содержания ртути в тканях рыб разных трофических групп. Концентрации ряда тяжелых металлов определяли лишь в мышцах леща [1, 4]. Информация по содержанию тяжелых металлов для хищных рыб, обитающих на разных плесах Рыбинского водохранилища и представляющих

собой последнее звено трофических цепей водоема, отсутствует.

Судак *Sander lucioperca* – крупный пелагический хищник-мелиоратор, который питается мелкими видами рыб [8]. Мясо судака характеризуется низким содержанием жира, а также хорошим составом белка и жирных кислот, что делает этот вид очень привлекательным для использования в пищевых целях. На Рыбинском водохранилище судак является одним из важнейших объектов коммерческого рыболовства [7, 10, 11].

Цель настоящей работы – изучить содержание тяжелых металлов в мышечной ткани судака из Рыбинского водохранилища и сравнить его с российскими и международными стандартами.

Материал и методика исследования

Объектом исследования был судак, выловленный из двух районов Рыбинского водохранилища, которые отличаются друг от друга уровнем антропогенного загрязнения. Места отлова – в Волжском плесе (58° 05' с. ш., 38° 17' в. д.) и Шекснинском плесе (59° 01' с. ш., 37° 51' в. д.). Станция траления в Волжском плесе считается условно-чистой. В район станции траления Шекснинского плеса поступает наибольшее количество сточных вод с предприятий, поэтому данный участок считается самым загрязненным. В донных отложениях Шекснинского плеса аккумулируются тяжелые металлы и стойкие органические загрязнители – полихлорированные бифенилы и полиароматические углеводороды [2].

Рыб отлавливали тралом в нагульный период. Всего было отобрано 26 особей судака.

После поимки рыба проходила акклимацию в контейнерах с речной водой. Затем у каждой особи проводили измерения для биологического анализа, после чего на хладагенте отделяли кожу от костных мышц, вдоль позвоночника иссекали пробу мышечной ткани. Ткань замораживали до проведения химического анализа.

В лаборатории образцы мышц высушивали при температуре 60 °С до достижения их постоянной массы в сушильном шкафу, затем измельчали в ла-

бораторной мельнице. В пробах определяли концентрацию тяжелых металлов: кадмия (Cd), хрома (Cr), свинца (Pb), меди (Cu), марганца (Mn), железа (Fe), алюминия (Al), кобальта (Co), никеля (Ni), ванадия (V). Анализ образцов проводился на оптическом эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ОЭС ИСП) Optima 2000 DV (Perkin-Elmer, США). Калибровка прибора проводилась с использованием моно- и мультиэлементных калибровочных стандартов для ОЭС ИСП (Perkin-Elmer, США). Для приготовления образцов и калибровочных растворов использовалась деионизированная вода, полученная с помощью системы Milli-Q Purify System (Millipore, Bedford, MA, США). Полученные результаты выражали в мг/кг сырого веса.

У особей рассчитывали коэффициенты упитанности по Фультону и Кларк [12].

Статистическая обработка производилась в программе MS Excel 2007 и с помощью программы анализа данных AtteStat. Так как у исследуемых показателей не соблюдались условия нормальности распределения по критерию Шапиро – Уилка, для оценки достоверности различий использовали непараметрический критерий U Манна – Уитни для парных сравнений. Данные представлены в виде средних значений и их стандартных ошибок ($M \pm m$).

Результаты и их обсуждение

Данные по размеру и упитанности особей судака из Волжского и Шекснинского плесов достоверно не различались (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Морфофизиологические показатели исследованных особей судака из разных плесов Рыбинского водохранилища

Morphophysiological parameters of the studied pikeperch species from different reaches of the Rybinsk Reservoir

Плес	Морфофизиологический показатель					
	n	Длина тела, мм	Масса тела, г	Масса тела без внутренностей, г	Упитанность по Фультону	Упитанность по Кларк
Шекснинский	13	365 ± 43,5	723 ± 177	647 ± 159	1,45 ± 0,14	1,29 ± 0,11
Волжский	13	381 ± 4,15	796 ± 34,3	722 ± 30,0	1,36 ± 0,01	1,24 ± 0,01

Упитанность рыб зависит от многих факторов внешней среды и может использоваться для оценки как условий обитания, так и состояния популяции. Коэффициенты упитанности по Фультону и по Кларк у исследованных особей соответствовали средним значениям показателя судака из водоемов этой рыболовной зоны [10]. Данный факт косвенно свидетельствует о благоприятном состоянии популяции судака Рыбинского водохранилища.

В мышцах рыб, обитающих в Шекснинском плесе, выявлено повышенное содержание Al, Mn и Fe. Различия в содержании Cd, Cu, Pb, Co, Cr в мышечной ткани судака из плесов, различающихся уровнем антропогенной нагрузки, не были статистически значимыми. Содержание Ni и V было ниже предела обнаружения (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Содержание тяжелых металлов в мышцах судака из разных плесов Рыбинского водохранилища

Content of heavy metals in the muscle tissues of pikeperch from different reaches of the Rybinsk Reservoir

Содержание тяжелых металлов, мг/кг	Плес	
	Шекснинский	Волжский
n	13	13
Cd	0,002 ± 0,001	0,006 ± 0,001
Pb	0,020 ± 0,005	0,032 ± 0,004
Ni	НПО*	НПО
V	НПО	НПО
Al	9,637 ± 2,388	4,382 ± 0,349**
Co	0,001 ± 0,000	0,002 ± 0,001
Cr	0,101 ± 0,014	0,092 ± 0,006
Cu	0,666 ± 0,096	0,775 ± 0,034
Fe	9,78 4 ± 3,686	2,108 ± 0,204**
Mn	0,288 ± 0,090	0,155 ± 0,005**

* НПО – ниже пределов обнаружения; ** достоверно различаются между плесами.

Вне зависимости от плесов выявлена следующая закономерность интенсивности накопления металлов в мышечной ткани судака: $Ni = V < Co < Cd < Pb < Cr < Mn < Cu < Al < Fe$. Наши результаты относительно интенсивности аккумуляции тяжелых металлов в мышцах исследованных особей отличаются от подобных исследований судака из других водоемов [5, 13]. Однако полученные данные по преобладанию содержания Pb над Cd в мышцах судака были сопоставимы с рядом исследований [12, 14].

Известно, что группа неэссенциальных металлов (Cd, Pb) наиболее опасна для живых организмов [15]. Хронический токсический эффект от этих веществ может быть вызван даже при низких концентрациях [14]. Ионы Cd изменяют поведение рыб, влияют на темпы роста и упитанность, эффективность усвоения пищи [3]. Чрезмерное поступление Pb в организм рыб нарушает обмен веществ, снижает темпы роста и развития особей и их выживаемость [7]. У человека отравление Pb приводит к нарушению слуха, анемии, почечной недостаточности, ослаблению иммунитета, преждевременным родам, мертворождениям и выкидышам; Cd может вызывать дисфункцию почек, повреждение скелета и репродуктивную недостаточность [16].

Поступление металлов этой группы во внутренние водоемы неразрывно связано с увеличением промышленных стоков, при этом они не поддаются биологическому разложению [7, 8]. Предельно допустимая концентрация (ПДК) Cd для рыбохозяйственных водоемов составляет 0,005 мг/дм³; ПДК Pb – 0,006 мг/дм³ [17]. Отметим, что концентрация Cd и Pb в воде на всех исследованных участках была ниже порога токсического действия данных элементов [2]. Низкое содержание Cd и Pb в мышечной ткани судака может свидетельствовать о том, что мышцы не являются активным участком процесса накопления этих элементов. В литературе отмечают, что Cd и Pb интенсивнее аккумулируются в органах активного метаболизма, таких как почки и печень [14, 18], так, Cd накапливается в среднем до десяти раз больше в почках, чем в мышечной ткани [19].

К условно-эссенциальным элементам относятся Ni и V, они необходимы для нормального роста и размножения живых существ, но проявляют токсичный эффект при поступлении в организм в больших количествах [6, 11]. Как правило, интенсивная аккумуляция данных металлов происходит в метаболически-активных тканях рыб, например в печени и почках [9, 15, 20]. Характеризующийся канцерогенными и кумулятивными свойствами Ni техногенного происхождения наиболее токсичен для гонад и эмбрионов [9]. К опасным эффектам V относят окислительное повреждение, перекисное окисление липидов и нарушения гематологической, репродуктивной и дыхательной систем. У человека высокие концентрации Ni могут вызывать ряд проблем со здоровьем, таких как эмфизема, фиброз, кожные заболевания и различные поражения роговицы [9, 15].

В рыбохозяйственных водоемах ПДК Ni составляет 0,01 мг/дм³; ПДК V – 0,001 мг/дм³ [17]. Концентрация Ni в воде Рыбинского водохранилища составила 0,2 мкг/л, V – 1,0 мкг/л и была ниже порога токсического действия данных элементов [21]. Возможно, концентрация данных металлов в воде в совокупности со спецификой аккумуляции Ni и V в тканях определенных типов обусловило низкое содержание Ni и V в мышечной ткани судака вне зависимости от исследуемых участков водоема.

Неэссенциальным микроэлементом, токсичным для живых организмов, является Al. Высокая доза Al негативно влияет на метаболизм (особенно минеральный), а также на рост и деление клеток [9]. У человека избыточное количество Al может вызывать рак молочной железы, болезнь Альцгеймера, болезнь Паркинсона и боковой амиотрофической склероз [15]. Высокая концентрация Al в окружающей среде обеспечивает его интенсивное накопление в первую очередь в жабрах, оседая на их поверхности. В мягких тканях концентрация Al намного ниже [9, 11]. Следует отметить, что концентрация Al, наряду с Fe, по сравнению с другими исследуемыми элементами в мышечной ткани судака была наибольшей. Интенсивность накопления Al в мышцах судака Шекснинского плеса была выше. Для рыбохозяйственных водоемов ПДК Al составляет 0,04 мг/дм³ [17]. К сожалению, нам не удалось найти данных в открытой печати по концентрации Al в плесах Рыбинского водохранилища. В среднем в водохранилищах верхней Волги концентрация Al варьирует от 190 до 400 мг/дм³, что многократно превышает ПДК для данных металлов [9]. Данный факт свидетельствует о синхронности биоаккумуляции этого металла с его концентрацией в соответствующем водоеме. Большая интенсивность накопления Al в мышцах судака Шекснинского плеса по сравнению с другими металлами, вероятно, связана со спецификой сточных вод, поступающих в Рыбинское водохранилище.

Co, Cr, Cu, Fe очень важны для жизнедеятельности организмов и обладают синергическим эффектом, поэтому их концентрация и распределение в рыбе анализируются вместе [9]. Co жизненно необходим для многих ферментативных систем и для образования витаминов; Cr – незаменимый элемент и важный кофактор ферментов, влияющий на углеводный, липидный и белковый обмен; Cu является компонентом нескольких ферментов, участвует в тканевом дыхании, кроветворении, обменных процессах с участием минеральных веществ и азота, а также необходима для синтеза гемоглобина [9, 16, 18]; Fe участвует в переносе кислорода, респираторных цепных реакциях, синтезе ДНК и работе иммунной системы [7, 18]. Высокая концентрация этих металлов в водной среде токсична для рыб. Ионы Cu оказывают негативное влияние на морфологические и физиолого-биохимические показатели рыб, в том числе на активность пищевари-

тельных ферментов. Избыток Cu приводит к атрофии отдельных органов и тканей, эндемической анемии, нарушению кроветворения. Шестивалентный Cr обладает высокой канцерогенностью, активно вмешивается в метаболические процессы, регулирующие ионный транспорт [3, 9, 16]. Избыточное количество Co может вызвать гипотиреоз, гиперпродукцию эритроцитов [15]. Повышенное содержание Fe оказывает общетоксическое действие, разрушая антиоксидантную систему организма [22].

Предельно допустимая концентрация Co для рыбохозяйственных водоемов составляет 0,01 мг/дм³; Cr – 0,07 мг/дм³; Cu – 0,001 мг/дм³; Fe – 0,1 мг/дм³ [17]. Концентрации Co и Cr в Рыбинском водохранилище были ниже ПДК, Cu и Fe – выше. К сожалению, нам не удалось найти данных в открытой печати по концентрации Cu и Fe в плесах Рыбинского водохранилища. В среднем в Рыбинском водохранилище концентрация Cu составляет 0,03 мг/дм³, Fe – 0,33 мг/дм³, что превышает ПДК для данных металлов [21, 23]. Показано, что среди Cu и Fe наибольшей изменчивостью обладает Fe, т. к. наблюдается значимое увеличение его концентрации в мышечной ткани судака Шекснинского плеса по сравнению с Волжским.

Mn характеризуется высокой биологической активностью, в большей степени он накапливается в печени, чем в мышечной ткани, т. к. играет роль кофактора для активации ряда ферментов [3, 18]. Дефицит Mn может привести к серьезным скелетным и репродуктивным нарушениям, а избыток вы-

зывает окислительный стресс [15]. В международной практике Mn считается малотоксичным. Ранее было показано, что при комплексном загрязнении Mn обладает антагонистическими свойствами по отношению к таким металлам, как Cu и Al [9]. Возможно, с этим связано более интенсивное накопление Mn в мышечной ткани судака Шекснинского плеса по сравнению с Волжским при отсутствии данной закономерности для Cu и Al. Предельно допустимая концентрация Mn для рыбохозяйственных водоемов составляет 0,01 мг/дм³ [17]. Концентрация данных элементов в воде на всех исследованных участках Рыбинского водохранилища была ниже порога токсического действия [2].

В целом результаты мониторинговых исследований воды и донных отложений Рыбинского водохранилища позволяют сделать вывод, что водоем постепенно очищается от тяжелых металлов за последние десятилетия [21]. Результаты биотестирования воды и вытяжки донных отложений Рыбинского водохранилища указывают на то, что в пробах отсутствует острое токсическое воздействие [2]. Экосистема водоема находится в относительно устойчивом состоянии и не подвержена существенным воздействиям изменения внешней среды [1]. Возможно, по этой причине содержание многих исследованных тяжелых металлов в мышцах судака из плесов водохранилища достоверно не отличалось и соответствовало требованиям российских и международных стандартов (см. табл. 2, 3).

Таблица 3

Table 3

Российские и международные стандарты содержания тяжелых металлов в мышцах рыб*

Russian and international standards for the content of heavy metals in fish muscles*

Стандарт	Содержание тяжелых металлов, мг/кг									Источник
	Cd	Cr	Pb	Cu	Mn	Fe	Co	Ni	V	
ПДК (Россия)	0,1	–	1,0	10,0	–	30,0	–	0,5	–	[17]
Европейский Союз	0,050	–	0,3	–	–	–	–	–	–	[11]
Китай	–	2,0	0,5	50,0	–	–	–	–	–	[18]
Турция	0,05	–	0,2	20,0	–	–	–	–	–	
Всемирная организация здравоохранения	1,0	1,3	0,5	10,0	4,0	150,0	–	10,0	–	[15]
Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН	0,5	1,0	2,0	30,0	–	180,0	0,5	55,0	–	
FDA (США)	4,0	–	1,7	–	–	–	1,7	70,0	–	

* Примечание: прочерками обозначено отсутствие сведений по нормам содержания элемента в стандарте.

Таким образом, мясо исследованных нами особей судака потенциально безопасно для использования в пищу.

В среднем в мышцах судака из Рыбинского водохранилища содержалось 0,004 мг/кг Cd, 0,095 мг/кг Cr, 0,028 мг/кг Pb, 0,734 мг/кг Cu, 0,205 мг/кг Mn, 4,986 мг/кг Fe, 7,234 мг/кг Al, 0,002 мг/кг Co.

Известно, что на содержание тяжелых металлов в теле гидробионтов оказывает влияние не только

антропогенная нагрузка на водоем, концентрация и продолжительность воздействия элементов, но и гидрохимические факторы водной среды, т. к. растворимость ряда микроэлементов, находящихся в труднодоступных соединениях в илах, зависит от количества кислорода, pH и других условий [2, 3, 9, 15, 18]. Так, по содержанию Cd и Pb в мышцах исследованные особи из Рыбинского водохранилища превосходили судака из рек

Франции и Чехии, но уступали сородичам из озер Словении и Турции, рек Дунай (Болгария), Жайык и Кигаш (Казахстан), Каспийского моря [6, 7, 12, 13, 15, 22]. В мышечной ткани судака из р. Мулуя (Марокко) Cd оказалось меньше, Pb больше, чем у особей из Рыбинского водохранилища [14]. У судака из Рыбинского водохранилища Cr содержалось больше, чем у сородичей из оз. Бейшехир (Турция) и Волгоградского водохранилища, но меньше, чем в Горганском заливе Каспийского моря [5, 7, 18]. Содержание Cu в мышцах судака из Рыбинского водохранилища было больше, чем в мышцах судака из р. Сырдарья (Казахстан) и оз. Бейшехир (Турция) и Каспийского моря [18, 22, 24], и меньше по сравнению с сородичами из рек Жайык и Кигаш (Казахстан) и Волгоградского водохранилища [5, 13]. Исследованные нами особи судака характеризовались более низкими концентрациями Mn и Fe в мышцах по сравнению с рыбами из Бованского (Сербия), Сиди-Салем (Тунис), Новосибирского и Волгоградского водохранилищ, Каспийского моря [5, 8, 11, 15, 22, 25]. Исключение – судак из оз. Бейшехир, у которого содержание Mn в мышцах было ниже предела обнаружения [18].

В мышечной ткани судака из Рыбинского водохранилища содержание Al было выше, чем у его сородичей из Бованского водохранилища, а Co – ниже [11]. Также более высокая концентрация Co, по сравнению с нашим исследованием, обнаружена в мышцах судака из р. Нитра (Словакия) [19].

По содержанию Ni и V в мышцах судак из Рыбинского водохранилища уступал сородичам из водоемов Турции и Казахстана, болгарской части р. Дунай, Дубэсарского и Кучурганского водохранилищ Молдавии [6, 13, 16, 20, 24].

Зная, что биоаккумуляция тяжелых металлов может различаться в зависимости от времени года, пола, возраста, размера тела рыб [1, 8, 9, 20], следует продолжать дальнейшее изучение судака, увеличивая количество исследуемых особей и учитывая их пол, возраст, размер и сезон отбора проб. Кроме этого, для оценки состояния популяции и водной среды необходимо дополнительно проводить исследования в других органах и тканях гидробионтов, аккумулирующих тяжелые металлы.

Заключение

Исследования содержания тяжелых металлов в мышечной ткани судака из Рыбинского водохранилища ранее не проводились. Упитанность особей судака из Рыбинского водохранилища, вне зависимости от уровня локального антропогенного загрязнения, соответствовала средним значениям, характерным для вида в данной рыболовной зоне. В мышцах особей содержание Ni и V было ниже предела обнаружения. В среднем в ткани судака содержалось в мг/кг влажного веса Cd 0,004, Cr 0,095, Pb 0,028, Cu 0,734, Mn 0,205, Fe 4,986, Al 12,538, Co 0,002. Обнаружены достоверные различия в содержании Fe и Mn в мышечной ткани судака из Шекснинского и Волжского плесов. Потребление мяса судака из Рыбинского водохранилища не является потенциально опасным для здоровья человека, т. к. концентрации тяжелых металлов в мышечной ткани исследованных особей не превышают допустимые уровни элементов по российским и международным стандартам. Следует продолжать исследования содержания тяжелых металлов в теле судака разных половозрастных групп, в том числе в метаболически-активных тканях.

Список источников

1. Гремячих В. А., Ложкина Р. А., Комов В. Т. Пространственно-временная вариабельность содержания ртути в речном окуне *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 (Perciformes: Percidae) Рыбинского водохранилища на рубеже XX-XXI веков // Трансформация экосистем. 2019. № 2. С. 85–95.
2. Томлина И. И., Гапеева М. В., Ложкина Р. А. Экоотоксикологическая оценка качества воды и донных отложений // Структура и функционирование экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века. М.: Изд-во РАН, 2018. С. 371–388.
3. Голованова И. Л. Влияние тяжелых металлов на физиолого-биохимический статус рыб и водных беспозвоночных // Биология внутренних вод. 2008. № 1. С. 99–108.
4. Гапеева М. В. Биогеохимическое распределение тяжелых металлов в экосистеме Рыбинского водохранилища // Современное состояние экосистемы Рыбинского водохранилища. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. С. 42–49.
5. Зубкова В. М., Болотов В. П., Розумная Л. А. Содержание тяжелых металлов в тканях и органах разных видов рыб Волгоградского водохранилища // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Рыбное хозяйство. 2016. № 4. С. 93–98.
6. Peycheva K., Makedonski L., Merdzhanova A., Stancheva M. Evaluation of toxic metal levels in edible tissues of three wild captured freshwater fishes // Ovidius University Annals of Chemistry. 2014. V. 25. N. 1. P. 53–58.
7. Alipour H., Banagar G. R. Health risk assessment of selected heavy metals in some edible fishes from Gorgan Bay, Iran // Iranian Journal of Fisheries Sciences. 2018. N. 17 (1). P. 21–34.
8. Khemis I. B., Besbes Aridh N., Hamza N., M'hetli M., Sadok S. Heavy metals and minerals contents in pikeperch (*Sander lucioperca*), carp (*Cyprinus carpio*) and flathead grey mullet (*Mugil cephalus*) from Sidi Salem Reservoir (Tunisia): health risk assessment related to fish consumption // Environmental Science and Pollution Research. 2017. V. 24. N. 24. P. 19494–19507.
9. Moiseenko T. I., Kudryavtseva L. P., Gashkina N. A. Assessment of the geochemical background and anthropogenic load by bioaccumulation of microelements in fish // Water Resources. 2005. V. 32. N. 6. P. 640–652.
10. Payuta A. A., Flerova E. A. Some Indicators of Metabolism in the Muscles, Liver, and Gonads of Pike Perch *Sander lucioperca* and Sichel *Pelecus cultratus* from the Gorky Reservoir // Journal of Ichthyology. 2019. V. 59. N. 2. P. 255–262.
11. Milošković A., Simić V. Arsenic and other trace elements in five edible fish species in relation to fish size and weight and potential health risks for human consumption // Polish Journal of Environmental Studies. 2015. N. 24 (1). P. 199–206.
12. Noël L., Chekri R., Millour S., Merlo M., Leblanc J. C., Guérin T. Distribution and relationships of As, Cd, Pb and Hg

in freshwater fish from five French fishing areas // *Chemosphere*. 2013. V. 90. N. 6. P. 1900–1910.

13. Демесинова Г. Т. Оценка степени неорганического загрязнения рек Жайык и Кигаши // Халел Досмухамедов атындағы Атырау мемлекеттік университетінің Хабаршысы. 2015. № 4 (39). С. 159–162.

14. Mahjoub M., Fadlaoui S., El Maadoudi M., Smiri Y. Mercury, lead, and cadmium in the muscles of five fish species from the mehraa-hammadi dam in Morocco and health risks for their consumers // *Journal of Toxicology*. 2021. V. 2021. P. 1–10.

15. Sheikhzadeh H., Hamidian A. H. Bioaccumulation of heavy metals in fish species of Iran: a review // *Environmental Geochemistry and Health*. 2021. V. 43. N. 10. P. 3749–3869.

16. Yildirim Y., Gonulalan Z., Narin I., Soylak M. Evaluation of trace heavy metal levels of some fish species sold at retail in Kayseri, Turkey // *Environmental monitoring and assessment*. 2009. V. 149. N. 1. P. 223–228.

17. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: приказ Минсельхоза РФ № 552 от 13 декабря 2016 г. URL: https://www.chemanalytica.ru/f/prikaz_minsel_khoza_rossii_ot_13122016_n_552_ob_utverzhdenii_pdk.pdf (дата обращения: 25.05.2022).

18. Özparlak H., Arslan G., Arslan E. Determination of some metal levels in muscle tissue of nine fish species from the Beyşehir Lake, Turkey // *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2012. V. 12. N. 4. P. 761–770.

19. Stráňai I., Andreji J. Heavy metals (Co, Ni, Cr, Pb, Cd) content in tissues of Nitra river fishes // *Slovak Journal of Animal Science*. 2007. V. 40. N. 2. P. 97–104.

20. Зубков Е., Крепис О. Содержание металлов в рыбе из Дубэсарского и Кучурганского водохранилищ // *Buletinul Academiei de Ştiinţe a Moldovei. Ştiinţele vieţii*. 2008. V. 304. N. 1. P. 115–121.

21. Томилина И. И., Гапеева М. В., Ложкина Р. А. Оценка качества воды и донных отложений каскада водохранилищ реки Волга по показателям токсичности и химического состава // *Тр. Ин-та биологии внутр. вод РАН*. 2018. № 81 (84). С. 107–131.

22. Бигалиев А. Б., Кожамметова А. Н. Загрязнение нефтью и сопутствующими тяжелыми металлами, радионуклидами и накопление в организме гидробионтов казахстанской зоны Каспия // *Изв. Том. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331. № 12. С. 60–66.

23. Цельмович О. Л., Отокова Н. Г. Содержание железа и главных компонентов солевого состава в воде волжских водохранилищ в период открытой воды 2015 года // *Тр. Ин-та биологии внутр. вод РАН*. 2018. № 81 (84). С. 7–15.

24. Лопарева Т. Я., Шарипова О. А., Петрушенко Л. В. Уровень накопления токсикантов в мышечной ткани рыб в водных бассейнах Республики Казахстан // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Рыбное хозяйство*. 2016. № 2. С. 115–122.

25. Рявкина К. С., Коновалова Т. В., Короткевич О. С., Петухов В. Л. Аккумуляция марганца у самок и самцов в мышечной ткани и чешуе судака обыкновенного (*Sander lucioperca*) Новосибирского водохранилища // *Вестн. Новосиб. гос. аграр. ун-та*. 2021. № 1. С. 108–116.

References

1. Gremiachikh V. A., Lozhkina R. A., Komov V. T. Prostranstvenno-vremennaya variabelnost' soderzhaniia rtuti v rechnom okune Perca fluviatilis Linnaeus, 1758 (Perciformes: Percidae) Rybinskogo vodokhranilishcha na rubezhe XX-XXI vekov [Spatio-temporal variability of mercury content in river perch *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 (Perciformes: Percidae) of Rybinsk Reservoir at turn of 20th-21st centuries]. *Transformatsiya ekosistem*, 2019, no. 2, pp. 85-95.

2. Tomilina I. I., Gapeeva M. V., Lozhkina R. A. Ekotoksikologicheskaya otsenka kachestva vody i donnykh otlozhenii [Ecotoxicological assessment of water and bottom sediments quality]. *Struktura i funkcionirovanie ekosistemy Rybinskogo vodokhranilishcha v nachale XXI veka*. Moscow, Izd-vo RAN, 2018. Pp. 371-388.

3. Golovanova I. L. Vliianie tiazhelykh metallov na fiziologo-biokhimičeskii status ryb i vodnykh bespozvonochnykh [Influence of heavy metals on physiological and biochemical status of fish and aquatic invertebrates]. *Biologiya vnutrennikh vod*, 2008, no. 1, pp. 99-108.

4. Gapeeva M. V. Biogeokhimičeskoe raspredelenie tiazhelykh metallov v ekosisteme Rybinskogo vodokhranilishcha [Biogeochemical distribution of heavy metals in ecosystem of Rybinsk Reservoir]. *Sovremennoe sostoianie ekosistemy Rybinskogo vodokhranilishcha*. Saint-Petersburg, Gidrometeoizdat, 1993. Pp. 42-49.

5. Zubkova V. M., Bolotov V. P., Rozumnaia L. A. Soderzhanie tiazhelykh metallov v tkaniakh i organakh raznykh vidov ryb Volgogradskogo vodokhranilishcha [Heavy metals content in tissues and organs of different fish species of Volgograd Reservoir]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khoziaistvo*, 2016, no. 4, pp. 93-98.

6. Peycheva K., Makedonski L., Merdzhanova A., Stancheva M. Evaluation of toxic metal levels in edible tissues

of three wild captured freshwater fishes. *Ovidius University Annals of Chemistry*, 2014, vol. 25, no. 1, pp. 53-58.

7. Alipour H., Banagar G. R. Health risk assessment of selected heavy metals in some edible fishes from Gorgan Bay, Iran. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 2018, no. 17 (1), pp. 21-34.

8. Khemis I. B., Besbes Aridh N., Hamza N., M'hetli M., Sadok S. Heavy metals and minerals contents in pikeperch (*Sander lucioperca*), carp (*Cyprinus carpio*) and flathead grey mullet (*Mugil cephalus*) from Sidi Salem Reservoir (Tunisia): health risk assessment related to fish consumption. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, no. 24, pp. 19494-19507.

9. Moiseenko T. I., Kudryavtseva L. P., Gashkina N. A. Assessment of the geochemical background and anthropogenic load by bioaccumulation of microelements in fish. *Water Resources*, 2005, vol. 32, no. 6, pp. 640-652.

10. Payuta A. A., Flerova E. A. Some Indicators of Metabolism in the Muscles, Liver, and Gonads of Pike Perch *Sander lucioperca* and Sichel *Pelecus cultratus* from the Gorky Reservoir. *Journal of Ichthyology*, 2019, vol. 59, no. 2, pp. 255-262.

11. Milošković A., Simić V. Arsenic and other trace elements in five edible fish species in relation to fish size and weight and potential health risks for human consumption. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2015, no. 24 (1), pp. 199-206.

12. Noël L., Chekri R., Millour S., Merlo M., Leblanc J. C., Guérin T. Distribution and relationships of As, Cd, Pb and Hg in freshwater fish from five French fishing areas. *Chemosphere*, 2013, vol. 90, no. 6, pp. 1900-1910.

13. Demesiнова G. T. Otsenka stepeni neorganicheskogo zagriazneniia rek Zhaiyk i Kigash [Assessing inorganic pollution of Zhaiyk and Kigash rivers]. *Khalel*

Dosmykhamedov atyndaу Atyrau memlekettik universitetiniñ Khabarshysy, 2015, no. 4 (39), pp. 159-162.

14. Mahjoub M., Fadlaoui S., El Maadoudi M., Smiri Y. Mercury, lead, and cadmium in the muscles of five fish species from the mehraa-hammadi dam in Morocco and health risks for their consumers. *Journal of Toxicology*, 2021, vol. 2021, pp. 1-10.

15. Sheikhzadeh H., Hamidian A. H. Bioaccumulation of heavy metals in fish species of Iran: a review. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, vol. 43, no. 10, pp. 3749-3869.

16. Yildirim Y., Gonulalan Z., Narin I., Soylak M. Evaluation of trace heavy metal levels of some fish species sold at retail in Kayseri, Turkey. *Environmental monitoring and assessment*, 2009, vol. 149, no. 1, pp. 223-228.

17. *Ob utverzhenii normativov kachestva vody vodnykh ob'ektov rybokhoziaistvennogo znachenii, v tom chisle normativov predel'no dopustimyykh kontsentratsii vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob'ektov rybokhoziaistvennogo znachenii: prikaz Minsel'khoza RF № 552 ot 13 dekabria 2016 g.* [On approval of water quality standards for fishery water bodies, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of fishery water bodies: order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation No. 552 dated December 13, 2016]. Available at: https://www.chemanalytica.ru/f/prikaz_minselkhoza_rossii_ot_13_22016_n_552_ob_utverzhenii_pdk.pdf (accessed: 25.05.2022).

18. Özparlak H., Arslan G., Arslan E. Determination of some metal levels in muscle tissue of nine fish species from the Beyşehir Lake, Turkey. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2012, vol. 12, no. 4, pp. 761-770.

19. Stráňai I., Andreji J. Heavy metals (Co, Ni, Cr, Pb, Cd) content in tissues of Nitra river fishes. *Slovak Journal of Animal Science*, 2007, vol. 40, no. 2, pp. 97-104.

20. Zubkov E., Krepis O. Soderzhanie metallov v rybe iz Dubessarskogo i Kuchurganskogo vodokhranilishch [Content of metals in fish from Dubasari and Kuchurgan Reservoirs]. *Buletinul Academiei de Ştiinţe a Moldovei*.

Ştiinţele vieţii, 2008, vol. 304, no. 1, pp. 115-121.

21. Tomilina I. I., Gapeeva M. V., Lozhkina R. A. Otsenka kachestva vody i donnykh otlozhenii kaskada vodokhranilishch reki Volga po pokazateliam toksichnosti i khimicheskogo sostava [Evaluating quality of water and bottom sediments of reservoir cascade of Volga river in terms of toxicity and chemical composition]. *Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod RAN*, 2018, no. 81 (84), pp. 107-131.

22. Bigaliev A. B., Kozhakhmetova A. N. Zagriaznenie neft'iu i sopushtvuiushchimi tiazhelymi metallami, radionuklidami i nakoplenie v organizme gidrobiontov kazakhstanskoi zony Kaspiia [Pollution by oil and associated heavy metals, radionuclides and accumulation in bodies of hydrobionts of Kazakhstan zone of Caspian Sea]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 60-66.

23. Tsel'movich O. L., Otiukova N. G. Soderzhanie zheleza i glavnykh komponentov solevogo sostava v vode volzhskikh vodokhranilishch v period otkrytoi vody 2015 goda [Content of iron and main components of salt composition in water of Volga reservoirs during open water period of 2015]. *Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod RAN*, 2018, no. 81 (84), pp. 7-15.

24. Lopareva T. Ia., Sharipova O. A., Petrushenko L. V. Uroven' nakopleniia toksikantov v myshechnoi tkani ryb v vodnykh basseinakh Respubliki Kazakhstan [Level of toxicant accumulation in muscle tissue of fish in water basins of Republic of Kazakhstan]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khoziaistvo*, 2016, no. 2, pp. 115-122.

25. Riavkina K. S., Konovalova T. V., Korotkevich O. S., Petukhov V. L. Akkumulatsiia margantsa u samok i samtsov v myshechnoi tkani i cheshue sudaka obyknovennogo (*Sander lucioperca*) Novosibirskogo vodokhranilishcha [Accumulating manganese in female and male muscle tissues and scales of pikeperch (*Sander lucioperca*) in Novosibirsk Reservoir]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 108-116.

Статья поступила в редакцию 13.07.2022; одобрена после рецензирования 16.08.2022; принята к публикации 03.11.2022
The article is submitted 13.07.2022; approved after reviewing 16.08.2022; accepted for publication 03.11.2022

Информация об авторах / Information about the authors

Александра Александровна Паюта – кандидат биологических наук; младший научный сотрудник лаборатории экомониторинга и контроля качества; Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова; a.payuta@mail.ru

Екатерина Александровна Флерова – кандидат биологических наук, доцент; старший научный сотрудник лаборатории экомониторинга и контроля качества; Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова; katarinum@mail.ru

Юлия Владимировна Зайцева – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник лаборатории экомониторинга и контроля качества; Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова; zjv9@mail.ru

Aleksandra A. Payuta – Candidate of Sciences in Biology; Junior Researcher of the Laboratory of Ecobiomonitoring and Quality Control; P. G. Demidov Yaroslavl State University; a.payuta@mail.ru

Ekaterina A. Flerova – Candidate of Sciences in Biology, Assistant Professor; Senior Researcher of the Laboratory of Ecobiomonitoring and Quality Control; P. G. Demidov Yaroslavl State University; katarinum@mail.ru

Yuliya V. Zaitseva – Candidate of Sciences in Biology; Senior Researcher of the Laboratory of Ecobiomonitoring and Quality Control; P. G. Demidov Yaroslavl State University; zjv9@mail.ru

