

Научная статья
УДК 639.216.4 (282.247.413.5):591.1:546.4
<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-2-73-81>
EDN MQHQVN

Биохимические показатели мышц судака из Рыбинского водохранилища и оценка риска их потребления

Александра Александровна Паюта✉,
Екатерина Александровна Флёрова, Юлия Владимировна Зайцева

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

Аннотация. Рыба как пищевой компонент очень полезна для здоровья человека. Она богата белком, ценными жирными кислотами, витаминами и минералами. Однако при ее потреблении существуют риски поступления в организм человека токсичных веществ, накапливаемых в тканях гидробионтов, например тяжелых металлов. Цель работы – определить биохимические показатели в мышцах судака из плесов Рыбинского водохранилища, отличающихся антропогенной нагрузкой, и оценить риски потребления этого вида человеком. В мышечной ткани определяли количество воды, сухого вещества, липидов, белка, минеральных веществ и углеводов стандартными методами. Для оценки угрозы здоровью человека, связанной с потенциальной продолжительностью воздействия тяжелых металлов при потреблении судака, рассчитывали целевой и суммарный коэффициенты опасности. Оценка канцерогенного риска для здоровья человека определяли с помощью целевого и общего индексов риска развития рака. Расчетные показатели получали на основании данных о содержании в мышцах судака тяжелых металлов, установленных ранее. В мышцах особей судака из Шекснинского и Волжского плесов не обнаружено значимых отличий между биохимическими показателями. По соотношению белка и липидов в мышечной ткани исследованные особи относятся к категории А, по количеству липидов – к рыбам с низким содержанием жира. Показатели еженедельного поступления тяжелых металлов из мяса судака оказались ниже референсных значений. Целевой и суммарный коэффициенты опасности оказались меньше единицы, что указывает на отсутствие потенциального неканцерогенного риска для человека при потреблении мяса судака. Целевые индексы риска возникновения рака для Cd, Pb, Al и Cr находятся в приемлемых диапазонах. Суммарный риск развития рака по этим металлам составляет более 1 на 100 000.

Ключевые слова: судак *Sander lucioperca*, мышцы, Рыбинское водохранилище, тяжелые металлы, коэффициент опасности, канцерогенный риск, белок, липиды

Благодарности: работа выполнена при поддержке Государственного задания НИР № FENZ-2023-0004 Министерства науки и высшего образования РФ на период 2023–2027 гг.

Для цитирования: Паюта А. А., Флёрова Е. А., Зайцева Ю. В. Биохимические показатели мышц судака из Рыбинского водохранилища и оценка риска их потребления // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2024. № 2. С. 73–81. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-2-73-81>. EDN MQHQVN.

Original article

Biochemical parameters of pike-perch muscles from the Rybinsk reservoir and risk assessment of their consumption

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

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

Abstract. Fish, as a food component, is very beneficial for human health. It is rich in protein, valuable fatty acids, vitamins and minerals. However, when consuming it, there is a risk of toxic substances entering the human body that accumulate in the tissues of aquatic organisms, for example, heavy metals. The purpose of the work is to determine the biochemical parameters in the muscles of pike perch from the reaches of the Rybinsk reservoir, which differ in an-

thropogenic load, and to assess the risks of human consumption of this species. The amount of water, dry matter, lipids, protein, minerals and carbohydrates in muscle tissue was determined using standard methods. To assess the threat to human health associated with the potential duration of exposure to heavy metals from walleye consumption, target and cumulative hazard ratios were calculated. The assessment of carcinogenic risk to human health was determined using the target and general cancer risk index. Calculated indicators were obtained based on data on the content of heavy metals in the muscles of pike perch, established earlier. In the muscles of pike perch specimens from the Sheksninsky and Volzhsky reaches, no significant differences between biochemical parameters were found. According to the ratio of protein and lipids in muscle tissue, the studied individuals belong to category A, and according to the amount of lipids – to fish with a low-fat content. The estimated dietary intakes for weekly intakes of heavy metals from pike perch meat was below the reference values. The target and total hazard coefficient turned out to be less than one, which indicates that there is no potential non-carcinogenic risk for humans when consuming pike perch meat. The target cancer risk indices for Cd, Pb, Al and Cr are within acceptable ranges. The total risk of developing cancer for these metals is more than 1 in 100,000.

Keywords: pike-perch *Sander lucioperca*, muscle tissue, the Rybinsk reservoir, heavy metals, hazard ratio, carcinogenic risk, protein, lipids

Acknowledgment: the work was carried out with the support of the Russian Ministry of Science and Higher Education, Project No. FENZ-2023-0004.

For citation: Payuta A. A., Flerova E. A., Zaitseva Yu. V. Biochemical parameters of pike-perch muscles from the Rybinsk reservoir and risk assessment of their consumption. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry*. 2024;2:73-81. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2024-2-73-81>. EDN MQHQVN.

Введение

Рыба – один из ценнейших компонентов рациона человека, ее потребление способствует улучшению качества питания и сохранению продовольственной безопасности в мире. Мясо рыбы можно рассматривать как источник легкоусвояемого белка, минералов и витаминов, а также незаменимых ненасыщенных жирных кислот, которые улучшают здоровье человека и предотвращают возникновение сердечно-сосудистых, воспалительных и неврологических заболеваний. Согласно рекомендациям Всемирной организации здравоохранения, рыбу необходимо употреблять 2-3 раза в неделю для профилактики этих заболеваний [1]. Определение биохимического состава мышечной ткани рыб играет важную роль как в оценке качества мяса, потребляемого в пищу, в том числе для выражения его ценности в энергетических единицах, так и в прогнозе физиологического состояния гидробионтов, что важно для повседневного анализа рыбного промысла и его рациональной организации.

Наряду с преимуществами потребления рыбы существуют риски, обусловленные воздействием на человека токсичных веществ, которые могут накапливаться в тканях рыбы, т. к. она является вершиной водной пищевой цепи [2]. Одними из наиболее опасных загрязняющих веществ считаются тяжелые металлы, т. к. они не выводятся организмом, и их концентрация в нем увеличивается со временем [3]. Чрезмерное воздействие тяжелых металлов может привести к потенциально опасным нарушениям организма и развитию заболеваний, в том числе онкологических [4]. Так как токсическое воздействие тяжелых металлов на организм человека может нейтрализовать полезные свойства мяса гидробионтов, очень важно и необходимо изучать риски, связанные с потреблением рыбы в течение жизни.

Рыбинское водохранилище – крупнейший искусственный водоем Российской Федерации. В г. Чер-

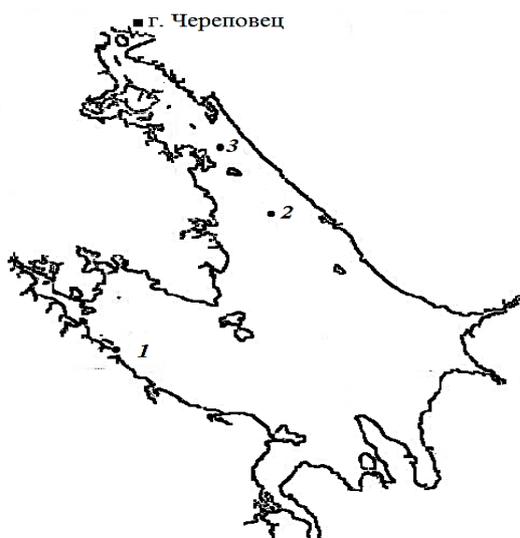
повец, расположенном у северо-восточной части водохранилища, широко развита химическая и металлургическая промышленность, в том числе здесь расположена крупнейшая горно-металлургическая компания «Северсталь». Этот район подвержен многолетнему загрязнению сточными водами с предприятий, учеными регистрируется значительное содержание тяжелых металлов в воде и донных отложениях [5]. Кроме этого, участок подвергается воздействию хозяйственно-бытовых сточных вод, а также диффузного стока с сельскохозяйственных угодий и автомобильных дорог [6]. Несмотря на загрязнение, на водоеме осуществляется активный рыбный промысел [7].

Судак *Sander lucioperca* из семейства окуневых (Percidae) представляет собой постную пресноводную рыбу с нейтральным вкусом, хорошим составом белка и жирных кислот, поэтому имеет коммерческую ценность на внутреннем рынке и в настоящее время активно используется промыслом. В Рыбинском водохранилище этот вид также является одним из важнейших объектов коммерческого и любительского рыболовства, при этом в водоеме отмечают снижение его численности [7–9].

Ранее мы определяли в мышечной ткани судака содержание тяжелых металлов, однако риски, связанные с продолжительным потреблением этого вида, не были учтены [8]. Поэтому целью настоящего исследования является определение биохимических показателей мышц судака и оценка рисков потребления мяса этого вида.

Материал и методика исследования

Объект исследования – 26 особей судака, отловленных тралом на стандартных станциях траления Волжского и Шекснинского плесов Рыбинского водохранилища в нагульный период (рис).



Карта-схема Рыбинского водохранилища, координаты станций отбора проб:

1 – 58° 23' с. ш., 37° 45' в. д.;
 2 – 58° 43' с. ш., 38° 16' в. д.; 3 – 58° 51' с. ш., 38° 06' в. д.

Schematic map of the Rybinsk reservoir, coordinates of sampling stations:

1 – 58° 23' n. w., 37° 45' e. l.;
 2 – 58° 43' n. w., 38° 16' e. l.; 3 – 58° 51' n. w., 38° 06' e. l.

Биологическая характеристика особей была приведена ранее в [8]. Материалом для исследования служила мышечная ткань, отделенная вдоль позвоночника на хладагенте.

В мышцах определяли количество воды, сухого вещества, липидов, белка, минеральных веществ, углеводов. Содержание воды и сухого вещества получали двухступенчатым методом определения влаги, содержание липидов – экстрагированием навески петролейным эфиром в аппарате Сокслета; белка – методом Кьельдаля, умножая полученное содержание азота на эмпирический коэффициент преобразования белка для рыб 6,25. Количество ми-

неральных веществ определяли гравиметрическим методом при температуре сжигания 550 °С, углеводов – расчетным путем, вычитая из 100 % сумму процентов воды, липидов, белка и золы. Показатель энергетической ценности был получен с использованием индивидуальных калорийных значений: 4,0 ккал для белка и 9,0 ккал для жира [10, 11].

На основании полученных ранее данных о содержании в мышцах судака тяжелых металлов определяли риск потребления мяса судака в пищу [8]. Для этого использовали оценку ежедневного (EDI) и еженедельного (EWI) поступления тяжелых металлов, целевого коэффициента опасности (THQ), суммарного коэффициента опасности (HI), целевого индекса риска развития рака (TR), общего индекса риска развития рака (TTR), которые рассчитывали по формулам [12, 13]

$$EDI = Ir \cdot C / BW;$$

$$EWI = EDI \cdot 7;$$

$$THQ = (EF \cdot ED \cdot Ir \cdot C) / (RfD \cdot BW \cdot TA);$$

$$HI = THQ_{Cd} + THQ_{Pb} + \dots + THQ_n \dots;$$

$$TR = (EF \cdot ED \cdot Ir \cdot C \cdot CSF) / (BW \cdot TA);$$

$$TTR = TR_{Cd} + TR_{Pb} + \dots + TR_n \dots,$$

где *Ir* – суточное потребление рыбы (по данным FAO на 2020 г., в РФ – 0,015 кг/день для пелагических рыб); *C* – концентрация металла в рыбе, мг/кг; *BW* – средняя масса человека (70 кг [14]); *EF* – частота воздействия тяжелых металлов на организм человека (365 дней/год); *ED* – продолжительность воздействия (70 лет [14]); *RfD* – эталонная пероральная доза; *TA* – среднее время экспозиции воздействия тяжелых металлов на организм человека (365 дней/год · *ED*); *CSF* – фактор канцерогенного потенциала; *TRn* – целевой индекс риска развития рака для каждого металла (*n*). Значения эталонной пероральной дозы и фактора канцерогенного потенциала исследуемых тяжелых металлов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Эталонная пероральная доза и фактор канцерогенного потенциала тяжелых металлов

Reference oral dose and carcinogenic potential factor of heavy metals

Элемент	RfD, мг/кг/день	CSF, мг/кг/день	Источник
Cd	0,001	15	[2, 13]
Pb	0,0035	0,0085	[13]
Al	1,0	0,021	[2, 15]
Cr	0,003	0,42	[12, 14]
Cu	0,04	–	[12]
Mn	0,14	–	[14]
Fe	0,7	–	[14]
Co	0,0003	–	[14]

* «–» – данные отсутствуют.

Значения *CSF* даны только для металлов, имеющих канцерогенный эффект.

Данные были проверены на нормальность распределения с использованием критерия Шапиро – Уилка в программе MS Excel 2007 и с помощью программы анализа данных AtteStat. Поскольку данные не отображали гауссово распределение, для оценки достоверности был применен непараметрический метод с использованием критерия U Манна – Уитни для сравнения между двумя независимыми выборками из различных районов отбора проб. Результаты исследований представлены в виде средних значений и их стандартных отклонений ($\bar{x} \pm SD$). Различия между сравниваемыми показателями считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Как известно, биохимические показатели, такие как содержание воды, белка и липидов в организме гидробионтов, могут служить индикаторами эко-

логического состояния особей и популяций рыб благодаря их количественному изменению под действием факторов внешней среды [1, 16, 17]. Количество воды в нормальном состоянии организма сохраняется на стабильных уровнях, а их изменение может быть связано с наступлением неблагоприятных условий местообитания [11, 17]. Запасные липиды являются важными показателями здоровья рыб, их содержание используется в качестве критерия оценки благополучия особей, в том числе в условиях токсического воздействия [18]. Интенсивный расход белков собственного тела происходит в основном в условиях недостатка протеина [19]. Углеводы легко мобилизуются, обеспечивая быстрый запас энергии для передвижения во время нападения на добычу или бегства от хищников, поэтому колебания их содержания менее упорядочены [17].

В нашем исследовании не выявлено значимых отличий между биохимическими показателями в мышцах судака из плесов Рыбинского водохранилища, отличающихся антропогенной нагрузкой (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Биохимические показатели мышц судака из Рыбинского водохранилища

Biochemical parameters of pike-perch muscles from the Rybinsk reservoir

Плес	Содержание, %						Энергетическая ценность, ккал
	воды	сухого вещества	белка	липидов	золы	углеводов	
Шекснинский	80,19 ± 1,23	19,81 ± 1,23	16,74 ± 0,97	1,14 ± 0,76	0,95 ± 0,09	0,99 ± 0,43	77,20 ± 8,81
Волжский	80,92 ± 1,07	19,08 ± 1,07	15,84 ± 1,40	0,90 ± 0,31	1,04 ± 0,08	1,31 ± 1,03	71,41 ± 6,91

Мышцы судака из Шекснинского плеса незначительно превосходили мышечную ткань судака из Волжского плеса по содержанию сухого вещества, в том числе белка и липидов, и уступали по количеству минеральных веществ и углеводов.

Между энергетической ценностью мяса судака из Шекснинского и Волжского плесов не выявлено достоверных отличий, значения показателя оказались близки (см. табл. 2).

Таким образом, можно предположить, что продолжительное локальное антропогенное загрязнение не оказывает влияния на накопление продуктов обмена веществ в мышцах судака. Ранее нами было обнаружено негативное воздействие загрязняющих веществ в районах Рыбинского водохранилища с повышенной антропогенной нагрузкой на аккумуляцию липидов и минеральных веществ в мышцах леща *Abramis brama* [20]. Вероятно, это связано с типом питания рыб: судак – пелагический хищник, лещ – типичный бентофаг, который, как известно, наиболее подвержен влиянию загрязняющих веществ из-за питания бентосом, населяющим донные отложения [16].

Следует отметить, что в ряде исследований, в том

числе у хищных рыб, отмечают более значимое влияние загрязняющих веществ на биохимические показатели в печени, чем в мышечной ткани, которая наименее подвержена токсической нагрузке. Авторы [16, 18] объясняют данные результаты тем, что печень характеризуется высокой метаболической активностью и является основным органом обмена веществ, а также высказывают предположение о достаточно высокой адаптивной устойчивости мышц к воздействию загрязняющих веществ. Вероятно, в том числе и по этим причинам в нашем исследовании не выявлено достоверных отличий между биохимическими показателями в мышцах судака, выловленного из районов с различной антропогенной нагрузкой.

Особенности местообитания и кормления оказывают влияние на интенсивность накопления биохимических показателей в теле рыб одного вида [11, 16, 17]. Так, в пределах водоемов Волго-Каспийского бассейна судак из Рыбинского водохранилища отличается меньшим количеством сухого вещества, в том числе белка, минеральных веществ и углеводов, но более высоким содержанием липидов, чем его сородичи из Горьковского

водохранилища [9]. В отличие от результатов текущего исследования, в мышцах особей судака из р. Соть, расположенной в особо охраняемой природной зоне – Государственном природном заказнике «Ярославский», – содержится меньше воды и белка, но больше липидов, минеральных веществ и углеводов [21]. Судак из водоемов Каспийского района отличается меньшим количеством воды и липидов в мышечной ткани, но большим содержанием белка и минеральных веществ, чем исследованные нами особи. Тем не менее калорийность мяса судака из Рыбинского водохранилища оказалась сопоставима с калорийностью мышц их сородичей из Каспийского района [11].

Судака из Рыбинского водохранилища по соотношению белка и липидов в мышечной ткани можно отнести к категории А, по содержанию липидов – к рыбам с низким содержанием жира [1, 22]. Жир в теле судака залегают в брюшной полости, обволакивая внутренности, главным образом кишечник. В мышечной ткани небольшие скопления жира заметны лишь в местах расположения соединительной ткани между пучками мышечных волокон [11].

Этим может объясняться низкое содержание липидов в мышцах особей судака. Высокое содержание белка в мясе судака делает этот вид привлекательным для использования в пищевых целях.

Считается, что один из главных источников поступления тяжелых металлов в организм человека – потребление рыбы в пищу, поэтому для оценки риска здоровья человека мы рассматривали оральный путь попадания этих веществ [3].

Потребление рыбы составляет важную часть рациона человека. По этой причине существует большой интерес к оценке ежедневного и еженедельного поступления в организм человека с рыбой тяжелых металлов. Такая оценка является общим показателем попадания загрязняющих веществ из этого пищевого продукта к человеку и зависит от количества, периода потребления и уровня загрязнения потребляемой рыбы [23]. Показатели суточного (*EDI*) и еженедельного (*EWI*) поступления в организм человека тяжелых металлов из мяса судака, потребляемого взрослым населением, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

Показатели суточного и еженедельного поступления в организм человека тяжелых металлов из мяса судака из Рыбинского водохранилища

Indicators of daily and weekly intake of heavy metals from pike-perch meat from the Rybinsk reservoir

Показатель	Целевой коэффициент опасности**							
	Cd	Pb	Al	Cr	Cu	Mn	Fe	Co
Шекснинский плес								
Суточное поступление тяжелых металлов	$4,29 \cdot 10^{-7}$	$4,29 \cdot 10^{-6}$	$2,07 \cdot 10^{-3}$	$2,16 \cdot 10^{-5}$	$1,42 \cdot 10^{-4}$	$6,17 \cdot 10^{-5}$	$2,10 \cdot 10^{-3}$	$2,14 \cdot 10^{-7}$
Еженедельное поступление тяжелых металлов	0,000003	0,00003	0,0145	0,00015	0,0009	0,00043	0,0147	0,000002
Волжский плес								
Суточное поступление тяжелых металлов	$1,28 \cdot 10^{-6}$	$6,86 \cdot 10^{-6}$	$9,39 \cdot 10^{-4}$	$1,97 \cdot 10^{-5}$	$1,66 \cdot 10^{-4}$	$3,32 \cdot 10^{-5}$	$4,52 \cdot 10^{-4}$	$4,29 \cdot 10^{-7}$
Еженедельное поступление тяжелых металлов	0,000009	0,00005	0,0066	0,00014	0,0012	0,00023	0,0032	0,000003
<i>PTWI*</i>	0,007	0,025	1,0	0,0233	3,5	–	0,08	–

* *PTWI* – предварительно допустимая еженедельная доза, по [2, 3, 22]; ** «–» – данные отсутствуют.

Показатели суточного поступления Cd, Pb, Cu, Co при потреблении мяса судака из Волжского плеса оказались выше, чем из Шекснинского, Al, Cr, Mn, Fe – ниже, что соответствует значениям распределения концентраций тяжелых металлов в мышечной ткани судака, полученным ранее [8].

Чтобы оценить потенциальный риск для здоровья

человека, мы проанализировали еженедельное поступление в организм человека тяжелых металлов, сравнив его с предварительно допустимой еженедельной дозой (*PTWI*) – референсным значением, указанным в Объединенном экспертном комитете ФАО/ВОЗ по пищевым добавкам (JECFA), представляющим собой безопасную еженедельную дозу

потребления загрязняющих веществ [3]. Согласно результатам нашего исследования полученные показатели *EWI* для судака из Рыбинского водохранилища оказались ниже референсных значений (см. табл. 3). Вклад судака из Шекснинского плеса в суточное поступление Cd, Pb, Al, Cr, Cu и Fe составил 0,04, 0,12, 1,45, 0,64, 0,026 и 18,4 %, из Волжского плеса – 0,13, 0,20, 0,66, 0,60, 0,034, 4,0 % от *PTWI* соответственно.

Угроза для здоровья человека, связанная с потен-

циальной продолжительностью воздействия тяжелых металлов при употреблении рыбы, оценивается при помощи целевого (*THQ*) и суммарного (*HI*) коэффициентов опасности. В нашем исследовании данные показатели были меньше единицы и не превышали допустимых уровней, что свидетельствует об отсутствии потенциального неканцерогенного риска при потреблении человеком мяса судака из Рыбинского водохранилища (табл. 4).

Таблица 4

Table 4

Показатели неканцерогенного риска для здоровья человека от тяжелых металлов в мышцах судака из Рыбинского водохранилища

Indicators of non-carcinogenic risk to human health from heavy metals in pike-perch muscles from the Rybinsk reservoir

Плес	Целевой коэффициент опасности								Суммарный коэффициент опасности
	Cd	Pb	Al	Cr	Cu	Mn	Fe	Co	
Шекснинский	0,0004	0,0012	0,0021	0,0072	0,0015	0,0150	0,0002	0,0007	0,0284
Волжский	0,0013	0,0020	0,0009	0,0066	0,0008	0,0032	0,0002	0,0014	0,0165

Такие тяжелые металлы, как Cd, Pb и Al, не встроены в каскад биохимических реакций организма, протекающих при его нормальном функционировании, и являются неэссенциальными. Их токсичность возрастает с увеличением концентрации, а недостаточное выведение данных металлов оказывает канцерогенное воздействие [3, 13]. Кадмий может привести к хронической токсичности даже при низких концентрациях и негативно повлиять на работу почек, легких, печени, органов половой и нервной системы, крови. Свинец вызывает нарушение слуха, приводит к анемии, почечной недостаточности и ослаблению иммунитета [8, 12]. Алюминий

может откладываться в костях, мозге, сердце, селезенке и мышцах, что приводит к кумулятивному негативному эффекту на эти системы с увеличением времени воздействия [15]. Потенциальный канцерогенный эффект отмечается и у хрома, который влияет на метаболизм липидов и сахара, может вызывать поражение печени, почек и легких [12, 24].

Показатели канцерогенного риска, указывающие на возрастающую вероятность появления онкологических заболеваний у человека в течение жизни из-за воздействия потенциального канцерогена, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Table 5

Показатели канцерогенного риска для здоровья человека от тяжелых металлов в мышцах судака из Рыбинского водохранилища

Indicators of carcinogenic risk to human health from heavy metals in pike-perch muscles from the Rybinsk reservoir

Плес	Целевой индекс риска развития рака				Общий индекс риска развития рака
	Cd	Pb	Al	Cr	
Шекснинский	$6,43 \cdot 10^{-6}$	$3,64 \cdot 10^{-8}$	$4,34 \cdot 10^{-5}$	$9,09 \cdot 10^{-6}$	$5,89 \cdot 10^{-5}$
Волжский	$1,93 \cdot 10^{-5}$	$5,83 \cdot 10^{-8}$	$1,97 \cdot 10^{-5}$	$8,28 \cdot 10^{-6}$	$4,73 \cdot 10^{-5}$

Значения показателя для Pb составили меньше $1 \cdot 10^{-8}$, для остальных элементов они варьировали в пределах от $6,43 \cdot 10^{-6}$ для Cd в мышцах судака из Шекснинского плеса до $4,34 \cdot 10^{-5}$ для Al в мышцах рыб из Шекснинского плеса. При значении целевого индекса развития рака более $1 \cdot 10^{-4}$ потребители находятся в зоне канцерогенного риска, при значе-

нии показателя менее $1 \cdot 10^{-6}$ риск развития рака считается незначительным [4, 12, 13].

При потреблении мяса судака из Рыбинского водохранилища суммарный риск возникновения рака от Cd, Pb, Al и Cr составляет более 1 на 100 000 (см. табл. 5). Наибольший вклад в общий индекс риска развития рака вносит алюминий.

Результаты нашего исследования указывают на то, что для судака из Шекснинского и Волжского плесов показатели как неканцерогенного, так и канцерогенного рисков находятся в приемлемых диапазонах. Однако, учитывая неблагоприятную обстановку по росту онкологических заболеваний в областях, близлежащих к Рыбинскому водохранилищу, необходимо контролировать данные показатели в мясе рыб, в том числе судака [25].

Заключение

В работе определены биохимические показатели (содержание воды, сухого вещества, белка, липидов, минеральных веществ и углеводов) мышеч-

ной ткани судака из Рыбинского водохранилища, а также риски использования ее в пищу. Исследование показывает, что мясо судака как из Шекснинского, так и из Волжского плесов является хорошим источником основных питательных веществ. Продолжительное локальное антропогенное воздействие не оказывает влияния на накопление продуктов обмена веществ в мышечной ткани судака, т. к. показатели неканцерогенного и канцерогенного рисков находятся в приемлемых диапазонах. Можно сделать вывод о том, что мясо судака из Рыбинского водохранилища может быть рекомендовано для употребления в пищу человека.

Список источников

1. Ahmed I., Jan K., Fatma S., Dawood M. A. Muscle proximate composition of various food fish species and their nutritional significance: A review // J. Anim. Feed. Sci. 2022. V. 106. N. 3. P. 690–719. DOI: 10.1111/jpn.13711.
2. Hasanein S. S., Mourad M. H., Haredi A. M. M. The health risk assessment of heavy metals to human health through the consumption of *Tilapia* spp and catfish caught from Lake Mariut, Egypt // Heliyon. 2022. V. 8. N. 7. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09807.
3. Alipour H., Banagar G. R. Health risk assessment of selected heavy metals in some edible fishes from Gorgan Bay, Iran // IJFS. 2018. N. 17 (1). P. 21–34.
4. Saher N. U., Kanwal N. Assessment of some heavy metal accumulation and nutritional quality of shellfish with reference to human health and cancer risk assessment: a sea-food safety approach // ESPR. 2019. V. 26. P. 5189–5201.
5. Chuiko G. M., Tomilina I. I., Brodsky E. S., Shelepchikov A. A., Mir-Kadyrova E. Y., Pavlov D. F., Tillitt D. E. Accumulation of polychlorinated biphenyls (PCB) associated with bottom sediments in larvae of *Chironomus riparius* Meigen // Limnologia. 2021. V. 90. P. 125912.
6. Lozhkina R. A., Tomilina I. I., Gapeeva M. V. Long-term dynamics of the water quality in the Rybinsk reservoir according to biotesting // Ecosyst. Transform. 2020. V. 3. P. 48–61.
7. Герасимов Ю. В., Малин М. И., Соломатин Ю. И., Базаров М. И., Бражник С. Ю. Распределение и структура рыбного населения в водохранилищах Волжского каскада в 1980-е и 2010-е гг. // Тр. ИБВВ РАН. 2018. № 82 (85). С. 81–105.
8. Паюта А. А., Флерова Е. А., Зайцева Ю. В. Содержание тяжелых металлов в мышечной ткани судака *Sander lucioperca* в разных плесах Рыбинского водохранилища // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Рыбное хозяйство. 2022. № 4. С. 135–142.
9. Payuta A. A., Flerova E. A. Some indicators of metabolism in the muscles, liver, and gonads of pike-perch *Sander lucioperca* and sibel *Pelecus cultratus* from the Gorky Reservoir // J. Ichthyol. 2019. V. 59. P. 255–262.
10. Флерова Е. А. Физиолого-биохимические методы исследования рыб. Ярославль: Изд-во Ярослав. ГСХА, 2014. 40 с.
11. Клейменов И. Я. Химический и весовой состав рыб водоемов СССР и зарубежных стран. М.: Изд-во журн. «Рыб. хоз-во», 1962. 143 с.
12. Vu C. T., Lin C., Yeh G., Villanueva M. C. Bioaccumulation and potential sources of heavy metal contamination in fish species in Taiwan: assessment and possible human health implications // ESPR. 2017. V. 24. P. 19422–19434.
13. Barone G., Storelli A., Garofalo R., Mallamaci R., Storelli M. M. Residual levels of mercury, cadmium, lead and arsenic in some commercially key species from Italian coasts (Adriatic Sea): Focus on human health // Toxics. 2022. V. 10. N. 5. P. 223.
14. Овсиенко С. В., Кузьмина Н. Е., Щукин В. М., Хорольская Е. А. Разработка комплексного подхода к оценке содержания элементных контаминантов в нативных продуктах на основе лекарственного растительного сырья и его применение к семенам тыквы // Вестн. Науч. центра экспертизы средств мед. применения. 2022. Т. 12. № 2. С. 149–160.
15. de Almeida C. C., Baião D. D. S., Rodrigues P. D. A., Saint-Pierre T. D., Hauser-Davis R. A., Leandro K. C., Paschoalin V. M. F., da Costa M. P., Conte-Junior C. A. Toxic Metals and Metalloids in Infant Formulas Marketed in Brazil, and Child Health Risks According to the Target Hazard Quotients and Target Cancer Risk // IJERPH. 2022. V. 19. N. 18. P. 11178.
16. Payuta A. A., Flerova E. A. Impact of habitation conditions on metabolism in the muscles, liver, and gonads of different sex and age groups of bream // Regul. Mech. Biosyst. 2021. V. 12. N. 2. P. 240–250.
17. Lloret J., Shulman G. E., Love R. M. Condition and health indicators of exploited marine fishes. Oxford: Wiley Blackwell, 2014. 264 p.
18. Васильева О. Б., Назарова М. А., Ильмаст Н. В., Немова Н. Н. Липиды тканей рыб из акваторий Онежского озера с разной степенью антропогенного загрязнения // Тр. КарНЦ РАН. 2018. № 6. С. 95–102.
19. Байдалинова Л. С., Яржомбек А. А. Биохимия сырья водного происхождения. М.: Моркнига, 2011. 510 с.
20. Payuta A. A., Pryanichnikova E. G., Shcherbina G. K., Perova S. N., Flerova E. A. Physiological parameters of bream (*Abramis brama* L.) in parts of the Rybinsk Reservoir of different types // Inland Water Biol. 2019. V. 12. P. 217–224.
21. Паюта А. А., Богданова А. А., Флерова Е. А., Мирошниченко Д. А., Малин М. И., Андреева М. И. Химический состав мышц рыб малых рек Ярославской области // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Рыбное хозяйство. 2019. № 1. С. 112–121.
22. Nurnadia A. A., Azrina A., Amin I. Proximate composition and energetic value of selected marine fish and shellfish from the West coast of Peninsular Malaysia // Int. Food Res. J. 2011. V. 18. N. 1. P. 137–148.

23. Solgi E., Alipour H., Majnooni F. Investigation of the concentration of metals in two economically important fish species from the Caspian Sea and assessment of potential risk to human health // *Ocean Sci. J.* 2019. V. 54. P. 503–514.

24. Kapoor R. T., Mfarrej M. F. B., Alam P., Rinklebe J., Ahmad P. Accumulation of chromium in plants and its re-

percussion in animals and humans // *Env. Pollut.* 2022. V. 301. P. 119044.

25. Синицын И. С. Пространственные и возрастные особенности эколого-обусловленных заболеваний населения Ярославской области // *Ярославский пед. вестн.* 2011. Т. 3. № 2. С. 160.

References

1. Ahmed I., Jan K., Fatma S., Dawood M. A. Muscle proximate composition of various food fish species and their nutritional significance: A review. *J. Anim. Feed. Sci.*, 2022, vol. 106, no. 3, pp. 690-719. DOI: 10.1111/jpn.13711.

2. Hasanein S. S., Mourad M. H., Haredi A. M. M. The health risk assessment of heavy metals to human health through the consumption of Tilapia spp and catfish caught from Lake Mariut, Egypt. *Heliyon*, 2022, vol. 8, no. 7. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09807.

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

4. Saher N. U., Kanwal N. Assessment of some heavy metal accumulation and nutritional quality of shellfish with reference to human health and cancer risk assessment: a sea-food safety approach. *ESPR*, 2019, vol. 26, pp. 5189-5201.

5. Chuiko G. M., Tomilina I. I., Brodsky E. S., Shelepchikov A. A., Mir-Kadyrova E. Y., Pavlov D. F., Tillitt D. E. Accumulation of polychlorinated biphenyls (PCB) associated with bottom sediments in larvae of *Chironomus riparius* Meigen. *Limnologica*, 2021, vol. 90, p. 125912.

6. Lozhkina R. A., Tomilina I. I., Gapeeva M. V. Long-term dynamics of the water quality in the Rybinsk reservoir according to biotesting. *Ecosyst. Transform.*, 2020, vol. 3, pp. 48-61.

7. Gerasimov Iu. V., Malin M. I., Solomatina Iu. I., Bazarov M. I., Brazhnik S. Iu. Распределение и структура рыбного населения в водохранилищах Волжского каскада в 1980-е и 2010-е гг. [Distribution and structure of the fish population in the reservoirs of the Volga Cascade in the 1980s and 2010s.]. *Trudy IBVV RAN*, 2018, no. 82 (85), pp. 81-105.

8. Paiuta A. A., Flerova E. A., Zaitseva Iu. V. Soderzhanie tiazhelykh metallov v myshechnoi tkani sudaka *Sander lucioperca* v raznykh plesakh Rybinskogo vodokhranilishcha [The content of heavy metals in the muscle tissue of the *Sander lucioperca* walleye in different ples of the Rybinsk reservoir]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khoziaistvo*, 2022, no. 4, pp. 135-142.

9. Payuta A. A., Flerova E. A. Some indicators of metabolism in the muscles, liver, and gonads of pike-perch *Sander lucioperca* and sibel *Pelecus cultratus* from the Gorky Reservoir. *J. Ichthyol.*, 2019, vol. 59, pp. 255-262.

10. Flerova E. A. *Fiziologo-biokhimicheskie metody issledovaniia ryb* [Physiological and biochemical methods of fish research]. Iaroslavl', Izd-vo Iaroslavl. GSKhA, 2014. 40 p.

11. Kleimenov I. Ia. *Khimicheskii i vesovoi sostav ryb vodoemov SSSR i zarubezhnykh stran* [Chemical and weight composition of fish in reservoirs of the USSR and foreign countries]. Moscow, Izd-vo zhurn. «Rybnoe khoziaistvo», 1962. 143 p.

12. Vu C. T., Lin C., Yeh G., Villanueva M. C. Bioaccumulation and potential sources of heavy metal contamination in fish species in Taiwan: assessment and possible human health implications. *ESPR*, 2017, vol. 24, pp. 19422-19434.

13. Barone G., Storelli A., Garofalo R., Mallamaci R., Storelli M. M. Residual levels of mercury, cadmium, lead and arsenic in some commercially key species from Italian coasts (Adriatic Sea): Focus on human health. *Toxics*, 2022, vol. 10, no. 5, p. 223.

14. Ovsienko S. V., Kuz'mina N. E., Shchukin V. M., Khorol'skaia E. A. Razrabotka kompleksnogo podkhoda k otsenke soderzhaniiia elementnykh kontaminantov v nativnykh produktakh na osnove lekarstvennogo rastitel'nogo syr'ia i ego primenenie k semenam tykvy [Development of an integrated approach to the assessment of the content of elemental contaminants in native products based on medicinal plant raw materials and its application to pumpkin seeds]. *Vedomosti Nauchnogo tsentra ekspertizy sredstv meditsinskogo primeneniia*, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 149-160.

15. de Almeida C. C., Baião D. D. S., Rodrigues P. D. A., Saint-Pierre T. D., Hauser-Davis R. A., Leandro K. C., Paschoalin V. M. F., da Costa M. P., Conte-Junior C. A. Toxic Metals and Metalloids in Infant Formulas Marketed in Brazil, and Child Health Risks According to the Target Hazard Quotients and Target Cancer Risk. *IJERPH*, 2022, vol. 19, no. 18, p. 11178.

16. Payuta A. A., Flerova E. A. Impact of habitation conditions on metabolism in the muscles, liver, and gonads of different sex and age groups of bream. *Regul. Mech. Biosyst.*, 2021, vol. 12, no. 2, pp. 240-250.

17. Lloret J., Shulman G. E., Love R. M. *Condition and health indicators of exploited marine fishes*. Oxford, Wiley Blackwell, 2014. 264 p.

18. Vasil'eva O. B., Nazarova M. A., Il'mast N. V., Nemova N. N. Lipidy tkanei ryb iz akvatorii Onezhskogo ozera s raznoi stepen'iu antropogennoho zagriazneniia [Lipids of fish tissues from the waters of Lake Onega with varying degrees of anthropogenic pollution]. *Trudy KarNTs RAN*, 2018, no. 6, pp. 95-102.

19. Baidalina L. S., Iarzhombek A. A. *Biokhimiia syr'ia vodnogo proiskhozhdeniia* [Biochemistry of raw materials of aquatic origin]. Moscow, Morkniga Publ., 2011. 510 p.

20. Payuta A. A., Pryanichnikova E. G., Shcherbina G. K., Perova S. N., Flerova E. A. Physiological parameters of bream (*Abramis brama* L.) in parts of the Rybinsk Reservoir of different types. *Inland Water Biol.*, 2019, vol. 12, pp. 217-224.

21. Paiuta A. A., Bogdanova A. A., Flerova E. A., Miroshnichenko D. A., Malin M. I., Andreeva M. I. Khimicheskii sostav myshts ryb malykh rek Iaroslavskoi oblasti [Chemical composition of fish muscle of small rivers of the Yaroslavl Region]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khoziaistvo*, 2019, no. 1, pp. 112-121.

22. Nurnadia A. A., Azrina A., Amin I. Proximate composition and energetic value of selected marine fish and shellfish from the West coast of Peninsular Malaysia. *Int. Food Res. J.*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 137-148.

23. Solgi E., Alipour H., Majnooni F. Investigation of the concentration of metals in two economically important

fish species from the Caspian Sea and assessment of potential risk to human health. *Ocean Sci. J.*, 2019, vol. 54, pp. 503-514.

24. Kapoor R. T., Mfarrej M. F. B., Alam P., Rinklebe J., Ahmad P. Accumulation of chromium in plants and its repercussion in animals and humans. *Env. Pollut.*, 2022, vol. 301, p. 119044.

25. Sinitsyn I. S. Prostranstvennye i vozrastnye osobennosti ekologo-obuslovlennykh zabolevanii naseleniia Iaroslavskoi oblasti [Spatial and age-related features of environmental-related diseases of the population of the Yaroslavl region]. *Iaroslavskii pedagogicheskii vestnik*, 2011, vol. 3, no. 2, p. 160.

Статья поступила в редакцию 19.01.2024; одобрена после рецензирования 17.05.2024; принята к публикации 28.05.2024
The article was submitted 19.01.2024; approved after reviewing 17.05.2024; accepted for publication 28.05.2024

Информация об авторах / Information about the authors

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

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

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

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

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

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

