

Научная статья

ОЦЕНКА РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ПОТРЕБЛЕНИИ ПРОМЫСЛОВЫХ РЫБ ГОРЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

А.А. Паюта, Е.А. Флёрова, Ю.В. Зайцева

Ярославский государственный университет имени П.Г. Демидова, Российская Федерация, 150003,
г. Ярославль, ул. Советская, 14

Объектами исследования являлись особи ценных промысловых видов из Горьковского водохранилища: лещ, судак и чехонь. Цель работы – определение элементного состава мышечной ткани и половых желёз рыб Горьковского водохранилища и оценка риска при их потреблении в пищу для здоровья человека.

Рыбы выловлены тралом со стандартных станций водохранилища. Для анализа отбирали мышечную ткань и гонады, которые взвешивали и замораживали до начала анализа при -18 °С. В лаборатории ткани высушивали при 60 °С до постоянной массы, измельчали, сжигали в муфельной печи при 550 °С. В пробах определяли Cd, Pb, Al, Co, Ni, Zn, Cu, Li, Cr, V методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой; Mn, Fe, Mg – методом спектрофотометрии. Калий определяли с применением пламенно-эмиссионной спектрометрии. Потребление рыбы рассчитывали на основании данных FAO с учетом массовой доли мяса и гонад.

Для оценки риска здоровью человека расчетным путем определяли коэффициент опасности, индексы опасности, хроническое ежедневное поступление металлов, канцерогенный риск от каждого канцерогенного вещества и их комплекса. Установлено повышенное содержание ряда металлов в исследованных тканях чехони в сравнении с аналогичными параметрами тканей леща и судака. Причиной более высокой контаминации тканей чехони может являться более широкий спектр питания особей этого вида. Значения суточного поступления металлов человеку из тканей исследованных рыб не превышали контрольные значения допустимого суточного поступления и рекомендуемой суточной нормы для взрослого населения. Значения коэффициентов и индексов опасности всех элементов не превышали допустимого порога. Значение канцерогенного риска развития рака при длительном употреблении в пищу мяса леща превышало установленные допустимые уровни. Показатели неканцерогенного и канцерогенного рисков были больше для сценария употребления в пищу тканей леща, чем судака и чехони.

Полученные данные могут быть использованы для информирования населения о потенциальных рисках для здоровья при употреблении в пищу промысловых рыб Горьковского водохранилища.

Ключевые слова: тяжелые металлы, лещ, судак, чехонь, Горьковское водохранилище, неканцерогенный риск, канцерогенный риск.

Водная среда, особенно внутренние воды, испытывает многогранное, высокое антропогенное воздействие [1]. Загрязнение водоемов и увеличение концентраций загрязняющих веществ обычно происходят в результате антропогенной деятельности: сброса сельскохозяйственных, муниципальных, бытовых или промышленных отходов, а также через очистные сооружения сточных вод [2, 3]. Металлы, попадая в водную среду, сохраняются в ней в растворенном или взвешенном состоянии и постепенно

оседают в донные отложения с течением времени, при этом гидробионты поглощают эти вещества [4].

Накопленные в рыбе тяжелые металлы могут нарушать полезные питательные свойства гидробионтов и попадать в организм людей по пищевой цепи, что приводит к рискам для здоровья [2, 5]. Изучение элементного состава тканей водных животных и оценка риска для здоровья человека важны для общественного здравоохранения по причине способности многих металлов к биоаккумуляции [6].

© Паюта А.А., Флёрова Е.А., Зайцева Ю.В., 2026

Паюта Александра Александровна – кандидат биологических наук, научный сотрудник научной лаборатории экомониторинга и контроля качества (e-mail: a.payuta@mail.ru; тел.: 8 (905) 638-94-75; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0478-4709>).

Флёрова Екатерина Александровна – кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник научной лаборатории экомониторинга и контроля качества (e-mail: katarinum@mail.ru; тел.: 8 (903) 829-01-80; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9745-6746>).

Зайцева Юлия Владимировна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник научной лаборатории экомониторинга и контроля качества (e-mail: zjv9@mail.ru; тел.: 8 (980) 703-53-01; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9522-010X>).

Горьковское водохранилище, созданное на густонаселенных промышленных территориях Ярославской, Костромской, Ивановской и Нижегородской областей, испытывает сильную антропогенную нагрузку. Химический состав воды Горьковского водохранилища зависит от качества вод Рыбинского водохранилища, а также от веществ, поступающих со стоками промышленных предприятий, расположенных в крупных городах, основанных на его берегах (Тутаева, Ярославля, Костромы, Кинешмы). В последние годы в Горьковском водохранилище преобладают створы с водой 3-го класса качества от «загрязненной» до «очень загрязненной» [7, 8]. В водоеме отмечают превышение ПДК по содержанию в воде Cu, Mn, Zn и стабильную токсическую нагрузку на донные отложения вблизи крупных населенных пунктов [9].

Несмотря на загрязнение, на Горьковском водохранилище ведется активный рыбный промысел. Согласно отчетам ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО)», за последние годы на его акватории промышленный лов осуществляет 28 организаций. Объем добычи составляет более 450 т рыбы. Лещ *Abramis brama* (Linnaeus, 1758) считается основным промысловым видом в водохранилище, его уловы превышают 40 % общего объема добычи. Высокую значимость в уловах играют также судак *Sander lucioperca* (Linnaeus, 1758) (6,8 % общего объема добычи) и чехонь *Pelecus cultratus* (Linnaeus, 1758) (3,5 % общего объема добычи) [10].

Мясо рыб является ценным продуктом питания благодаря высокому содержанию белка, омега-3, витаминов и минералов [2, 11]. Икра частиковых рыб, к которым относятся лещ, судак и чехонь, экономически более доступна и всё чаще используется в пищу независимо от сезона и дохода потребителей. Чаще всего ее используют в качестве заменителей икры или для потребления в сушеном или ферментированном виде [12, 13]. Поэтому определение элементного состава промысловых видов рыб носит как теоретический, так и практический аспекты.

Цель исследования – определение элементного состава мышц и гонад леща, судака и чехони Горьковского водохранилища и оценка риска для здоровья человека при потреблении этих видов в пищу.

Материалы и методы. Объектом исследования служили особи леща ($n = 94$, из которых ювенильных особей 11, самок – 51, самцов – 32), судака ($n = 17$, из которых самок 9, самцов – 8) и чехони ($n = 12$, из которых ювенильных особей 3, самок – 5, самцов – 4). Рыб вылавливали тралом в конце нагульного периода (сентябрь – октябрь) на стандартных станциях траления Горьковского водохранилища, измеряли, взвешивали. У рыб отсекали мышечную ткань вдоль позвоночника, из внутренней полости половозрелых самок и самцов иссекали гонады – яичники и семенники. Пробы взвешивали и

замораживали при $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до проведения анализа. В лаборатории ткани высушивали при $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сушильном шкафу SNOL 58/350 (AB UMEGA-GROUP, Литва), измельчали в лабораторной мельнице. Далее пробы сжигали в муфельной печи SNOL 8.2/1100 LSM 21 (AB UMEGA-GROUP, Литва) при $550\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Золу растворяли в 5 мл 20%-ной HCl и отфильтровывали через фильтровальную бумагу. В пробах определяли Cd, Pb, Al, Co, Ni, Zn, Cu, Li, Cr, V на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) Agilent 7500 (США), Mn, Fe, Mg – на спектрофотометре KVANT 2-AT (Kortec Ltd., Москва, Российская Федерация). Содержание калия определяли с применением пламенно-эмиссионной спектрометрии. Для получения показателей в гонадах рыб использовались объединенные данные по яичникам и семенникам на II и III стадии зрелости. Полученные результаты выражали в мг/кг влажного веса.

Химические вещества могут попадать в организм человека несколькими путями: пероральным, кожным и ингаляционным [14]. В текущей работе оценивался риск для здоровья человека при пероральном поступлении металлов с рыбой.

При оценке риска потребления рыб, в том числе гонад, традиционно используются либо данные Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (FAO) по суточному потреблению рыбной продукции, либо государственные суточные нормы потребления рыбы [1, 3, 13]. Однако массовая доля половых желёз рыб значительно меньше, чем мышечной ткани. В то же время статистика потребления рыбы рассчитывается на основе сырца – живой рыбы. В связи с этим показатели риска при подобных расчетах могут оказаться завышенными.

Нами была предпринята попытка провести оценку риска потребления мяса и гонад по отдельности с учетом их массовой доли. Для определения массовой доли мяса исследуемых особей рыб использовали данные по массе рыбы без внутренностей (массу порки), гонад – по массе яичников и семенников, полученных во время научной экспедиции.

В нашем исследовании массовая доля мяса от массы живой рыбы составляла для всех видов 88 %, гонад для леща – 1 %, судака – 0,45 %, чехони – 3,35 %. Для расчета суточного потребления рыбы в качестве общепринятого показателя мы использовали данные FAO по суточному потреблению рыбы. В Российской Федерации на 2022 г. оно составляло для пелагических рыб 0,013 кг/день, для донных – 0,024 кг/день. Таким образом, суточное потребление мяса леща, судака и чехони составило 0,021, 0,011 и 0,011 кг/день соответственно; гонад леща, судака и чехони – 0,00024, 0,00006 и 0,00044 кг/день соответственно.

Ежедневное поступление металлов из тканей рыб определялось путем умножения средних кон-

центраций каждого металла на количество рыбы, потребляемой в день, для взрослого человека по формуле (1):

$$EDI = \frac{Ir \cdot C}{BW}, \quad (1)$$

где EDI – ежедневное поступление металлов, Ir – суточное потребление мяса или гонад, кг/день, C – концентрация металла в рыбе, мг/кг, BW – средний вес человека (70 кг в РФ [14]).

Неканцерогенный риск оценивали путем расчета коэффициента опасности по формуле (2):

$$HQ = \frac{EF \cdot ED \cdot Ir \cdot C}{RfD \cdot BW \cdot TA}, \quad (2)$$

где HQ – неканцерогенный риск;

EF – частота воздействия (365 дней/год);
 ED – продолжительность воздействия (70 лет);
 Ir – суточное потребление мяса или гонад, кг/день;
 C – концентрация металла в рыбе, мг/кг;
 RfD – референтная доза, мг/кг/день;
 BW – средний вес человека, кг;
 TA – среднее время экспозиции (365 дней/год · ED).

Для оценки рисков для здоровья человека от комбинированного воздействия нескольких химических веществ с однонаправленным действием (кумулятивный риск) в настоящее время используется метод определения HI . Данный метод утверждает, что потенциал комбинированных доз химических веществ, вызывающих эффекты (помимо эффектов отдельных химических веществ), может быть консервативно оценен с использованием отношений доз химических веществ к разрешенным дозам химических веществ [15]. Таким образом, кумулятивный риск для каждого органа или системы органов определяли по формуле (3):

$$HI_k = \sum HQ_j, \quad (3)$$

где HI_k – индекс опасности развития нарушения функций k -х критических органов и систем, HQ_j – неканцерогенные риски для отдельных j -х компонентов смеси веществ, воздействующих на критические органы и системы k .

Уровень канцерогенного риска при хроническом воздействии определяли по формуле (4):

$$TR = \frac{EF \cdot ED \cdot Ir \cdot C \cdot SFO}{BW \cdot TA}, \quad (4)$$

где TR – канцерогенный риск;
 EF – частота воздействия (365 дней/год);
 ED – продолжительность воздействия (70 лет);
 Ir – суточное потребление мяса или гонад, кг/день;
 C – концентрация металла в рыбе, мг/кг;
 SFO – фактор наклона для перорального пути поступления химических канцерогенов, мг/кг/день;
 BW – средний вес человека, кг;
 TA – среднее время экспозиции.
 При воздействии нескольких канцерогенов суммарный канцерогенный риск для перорального пути поступления рассчитывался по формуле (5):

$$TCR = TR_{cd} + TR_{pb} + \dots + TR_n, \quad (5)$$

где TCR – суммарный канцерогенный риск, TR_{cd} – уровень канцерогенного риска от кадмия, TR_{pb} – уровень канцерогенного риска от свинца, TR_n – уровень канцерогенного риска от n -го токсиканта.

Методы оценки риска для здоровья человека, а также значения референтной дозы (RfD) и фактора наклона для перорального пути поступления химических канцерогенов (SFO) были взяты из отечественных и зарубежных официальных источников (P 2.1.10.3968-23¹, Integrated Risk Information System, IRIS² и Office of Environmental Health Hazard Assessment, ОЕННА CalEPA³).

Статистическую обработку полученных данных проводили с помощью программ Microsoft Excel 2007 и AtteStat. Полученные данные были проанализированы на соблюдение условий нормальности распределения по критерию Шапиро – Уилка. Достоверность различий между средними значениями оценивали методом Шеффе или с помощью критериев Краскела – Уоллеса и Данна при $P \geq 0,95$. Результаты представлены в виде средних значений и их стандартных отклонений ($x \pm SD$).

Результаты и их обсуждение. Концентрации различных металлов в мышцах и гонадах промысловых рыб из Горьковского водохранилища варьировались в пределах нескольких порядков: от 10^{-3} для Cd и Co до 10^3 для K (табл. 1, 2). Содержание ванадия во всех исследованных пробах оказалось ниже предела обнаружения.

¹ P 2.1.10.3968-23. Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих среду обитания / утв. Федеральной службой по надзору в сфере здравоохранения от 5 сентября 2023 г. [Электронный ресурс] // ГАРАНТ: информационно-правовое обеспечение. – URL: <https://base.garant.ru/408644981/> (дата обращения: 27.10.2025).

² Location-Specific Environmental Information [Электронный ресурс] // United States Environmental Protection Agency (US EPA). – URL: https://19january2021snapshot.epa.gov/environmental-topics/location-specific-environmental-information_.html (дата обращения: 27.10.2025).

³ Environmental Topics [Электронный ресурс] // The Office of Environmental Health Hazard Assessment (ОЕННА). – URL: <https://oehha.ca.gov/environmental-topics> (дата обращения: 27.10.2025).

Таблица 1

Содержание неэссенциальных элементов в тканях промысловых рыб Горьковского водохранилища, мг/кг

Вид	Cd	Pb	Al
<i>Мышцы</i>			
Лещ	0,0027 ± 0,0017 ^a	0,083 ± 0,037 ^a	19,19 ± 8,60
Судак	0,0031 ± 0,0010 ^a	0,092 ± 0,030 ^a	14,90 ± 3,09
Чехонь	0,0121 ± 0,0131 ^b	0,517 ± 0,352 ^b	25,44 ± 17,27
<i>Гонады</i>			
Лещ	0,0049 ± 0,0029	0,135 ± 0,101	113,17 ± 55,25
Судак	0,0044 ± 0,0010	0,147 ± 0,024	58,00 ± 10,25
Чехонь	0,0081 ± 0,0024	0,135 ± 0,027	140,13 ± 74,74

Примечание: здесь и в табл. 2 статистически значимые различия между показателями в столбце для отдельных тканей отмечены разными надстрочными буквенными индексами.

Таблица 2

Содержание эссенциальных элементов в тканях промысловых рыб Горьковского водохранилища, мг/кг

Металл	Мышечная ткань			Гонады		
	Лещ	Судак	Чехонь	Лещ	Судак	Чехонь
Co	0,0095 ± 0,0046 ^b	0,0048 ± 0,0018 ^a	0,0092 ± 0,0065 ^b	0,019 ± 0,008 ^a	0,049 ± 0,005 ^b	0,026 ± 0,004
Ni	0,078 ± 0,098	0,074 ± 0,044	0,116 ± 0,137	0,086 ± 0,033	0,085 ± 0,016	0,062 ± 0,041
Zn	9,61 ± 11,94 ^a	2,62 ± 0,41 ^a	25,93 ± 16,89 ^b	128,34 ± 65,46 ^a	35,79 ± 4,61 ^b	78,54 ± 6,38
Cu	1,58 ± 2,61	0,981 ± 0,302	0,901 ± 0,523	4,47 ± 6,38	1,58 ± 0,26	1,43 ± 1,17
Mn	0,644 ± 0,264	0,135 ± 0,024	0,854 ± 0,378	2,71 ± 2,63	6,68 ± 3,64	2,74 ± 1,02
Fe	23,78 ± 38,85	3,06 ± 1,31 ^a	11,90 ± 4,45 ^b	23,18 ± 10,15	28,57 ± 20,37	29,33 ± 15,16
Mg	0,502 ± 0,157	0,575 ± 0,058	0,587 ± 0,118	0,757 ± 0,343 ^a	1,32 ± 0,24 ^b	1,41 ± 0,12 ^b
Li	1,04 ± 1,34 ^a	2,19 ± 1,44 ^b	0,307 ± 0,224 ^c	2,39 ± 4,18	0,127 ± 0,042 ^a	2,51 ± 1,65 ^b
Cr	0,736 ± 0,410	0,589 ± 0,235	0,520 ± 0,187	2,72 ± 1,77	1,14 ± 0,06	2,13 ± 0,88
K	4527 ± 1444 ^a	2961 ± 179 ^b	3331 ± 1561 ^b	1840 ± 661 ^a	3452 ± 102 ^b	2266 ± 61

При сравнении элементного состава тканей исследованных видов рыб между собой выявлены некоторые особенности. В мышцах чехони содержалось достоверно больше Cd и Pb, чем в мышцах леща и судака (см. табл. 1). Средние концентрации алюминия в мышцах исследованных видов рыб существенно не отличались. В гонадах не обнаружено значимых отличий между содержанием неэссенциальных элементов у исследуемых видов.

Мышцы чехони характеризовались повышенным содержанием Zn и пониженным Li, по сравнению с мышечной тканью леща и судака (см. табл. 2). В мышцах судака накапливалось наименьшее количество кобальта и железа. Наибольшее содержание калия выявлено в мышечной ткани леща. Средние концентрации металлов в мышечной ткани исследуемых видов рыб существенно не отличались по Ni, Cu, Mn, Mg и Cr.

Гонады судака накапливали значимо меньше Zn и больше Co и K, чем половые железы леща (см. табл. 2). В гонадах чехони содержалось наибольшее количество лития, в гонадах леща – наименьшее количество магния. Не обнаружено значимых отличий между содержанием Ni, Cu, Mn, Fe и Cr в половых железах исследованных видов рыб.

В ряде исследований показано, что пресноводные всеядные виды рыб интенсивнее накапливают металлы в своем организме [16, 17]. Хотя есть и другие наблюдения, указывающие, что в теле пло-

тоядных рыб токсичные металлы аккумулируются в большей степени, чем у рыб с иными пищевыми привычками [18]. Вероятно, из-за более широкого спектра питания чехони, в который входит планктон, бентосные личинки хирономид, наземные и водные насекомые, а у взрослых особей – молодь других видов рыб, в тканях ее тела обнаружены более высокие значения тяжелых металлов, чем у леща и судака [19, 20].

В среднем содержание жизненно необходимых элементов в тканях исследованных видов рыб было выше, чем неэссенциальных. Их повышенное содержание объясняется тем, что они участвуют в работе биологических систем, а их дефицит может приводить к нарушению функционирования организма рыб [4, 5]. Однако в исследованных пробах в больших количествах обнаружен и алюминий – генно- и цитотоксический металл, не имеющий биологических функций и нарушающий обмен веществ гидробионтов, снижающий их воспроизводительную функцию, мозговую деятельность, приводящий к гистологическим повреждениям [21, 22]. Al, откладываясь в костях, мозге, сердце, селезенке и мышцах людей, может приводить к кумулятивному негативному эффекту на эти системы с увеличением времени воздействия [6]. Кроме этого, изучен нейротоксический эффект этого металла и доказан вклад в ухудшение когнитивных способностей и развитие болезни Альцгеймера [23].

Показатели суточного (*EDI*) поступления в организм взрослого человека металлов из мяса леща, судака и чехони Горьковского водохранилища показаны в табл. 3.

При потреблении мяса и половых гонад леща, судака и чехони в наибольшей степени в организм поступает калий, в наименьшей – кадмий и кобальт. Из-за большого потребления жителями Российской Федерации донных рыб при равной массовой доле мяса исследованных особей леща, судака и чехони поступление ряда элементов, в том числе неэссенциальных тяжелых металлов, от мышечной ткани леща оказалось выше, чем от мяса пелагических видов – судака и чехони, несмотря на более высокие концентрации этих элементов в их организме, по сравнению с лещом.

Полученные значения суточного поступления металлов из тканей промысловых рыб Горьковского водохранилища для каждого микро- и макроэлемента были гораздо ниже контрольных значений допустимого суточного поступления и рекомендованной суточной нормы для взрослого населения, регламентированных Р 2.1.10.3968-23, МР 2.3.1.0253-21⁴ и другими источниками [24, 25]. Поэтому на основании руководящих принципов FAO/WHO JECFA потребление мяса и половых гонад леща, судака и чехони нельзя считать оказывающим неблагоприятное воздействие на потребителей.

Говоря о поступлении металлов в организм человека, необходимо иметь в виду, что свойства элементов являются видоспецифичными, в связи с чем эссенциальные и неэссенциальные элементы могут

взаимодействовать антагонистически [26]. В частности, наиболее значимый антагонизм обнаружен между эссенциальными цинком и магнием и токсичными свинцом, кадмием и никелем⁵ [27, 28]. Отмечают снижение уровня V в сыворотке крови и Al в печени при получении животными Zn, что может свидетельствовать об антагонистических взаимодействиях этих металлов [29]. У разных живых организмов выявлены и другие пары антагонистов, например, Cd/Cu, Cu/Zn, Cu/Fe, Al/Mg, Al/Cu и другие [26, 30]. Антагонизм металлов играет защитную роль, которая проявляется в ингибировании ионами эссенциальных элементов токсического действия тяжелых металлов, включении защиты и усилении клеточного иммунного ответа⁵ [30].

Для оценки неканцерогенных рисков, связанных с продолжительностью воздействия токсикантов на здоровье человека при потреблении промысловых рыб из Горьковского водохранилища в течение жизни, проанализированы показатели, представленные в табл. 4.

Результаты анализа продемонстрировали, что показатель *HQ*, характеризующий хронический неканцерогенный риск при изолированном действии каждого токсиканта, для исследованных металлов не превышал допустимого порога (< 1) [31]. В научных публикациях, где показатели неканцерогенного риска определялись без учета массовой доли съедобных частей, для гонад получали более высокие значения этих показателей [3, 5, 13]. Однако в текущем исследовании гонады значительно уступали мышцам по значению показателей неканцерогенного риска.

Таблица 3

Ежедневное поступление металлов (*EDI*) из тканей промысловых рыб Горьковского водохранилища в организм взрослого человека, мг/кг/сут

Металл	Мышечная ткань			Гонады		
	Лещ	Судак	Чехонь	Лещ	Судак	Чехонь
Cd	$8,11 \cdot 10^{-7}$	$4,90 \cdot 10^{-7}$	$1,90 \cdot 10^{-6}$	$1,67 \cdot 10^{-8}$	$3,75 \cdot 10^{-9}$	$5,09 \cdot 10^{-8}$
Pb	$2,48 \cdot 10^{-5}$	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$8,13 \cdot 10^{-5}$	$4,64 \cdot 10^{-7}$	$1,26 \cdot 10^{-7}$	$8,48 \cdot 10^{-7}$
Al	$5,76 \cdot 10^{-3}$	$2,34 \cdot 10^{-3}$	$4,00 \cdot 10^{-3}$	$3,88 \cdot 10^{-4}$	$4,97 \cdot 10^{-5}$	$8,81 \cdot 10^{-4}$
Co	$2,86 \cdot 10^{-6}$	$7,52 \cdot 10^{-7}$	$1,44 \cdot 10^{-6}$	$6,52 \cdot 10^{-8}$	$4,17 \cdot 10^{-8}$	$1,62 \cdot 10^{-7}$
Ni	$2,34 \cdot 10^{-5}$	$1,16 \cdot 10^{-5}$	$1,82 \cdot 10^{-5}$	$2,96 \cdot 10^{-7}$	$7,25 \cdot 10^{-8}$	$3,89 \cdot 10^{-7}$
Zn	$2,88 \cdot 10^{-3}$	$4,12 \cdot 10^{-4}$	$4,08 \cdot 10^{-3}$	$4,40 \cdot 10^{-4}$	$3,07 \cdot 10^{-5}$	$4,94 \cdot 10^{-4}$
Cu	$4,73 \cdot 10^{-4}$	$1,54 \cdot 10^{-4}$	$1,42 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-5}$	$1,36 \cdot 10^{-6}$	$8,98 \cdot 10^{-6}$
Mn	$1,93 \cdot 10^{-4}$	$2,12 \cdot 10^{-5}$	$1,34 \cdot 10^{-4}$	$9,29 \cdot 10^{-6}$	$5,73 \cdot 10^{-6}$	$1,72 \cdot 10^{-5}$
Fe	$7,14 \cdot 10^{-3}$	$4,81 \cdot 10^{-4}$	$1,87 \cdot 10^{-3}$	$7,95 \cdot 10^{-5}$	$2,45 \cdot 10^{-5}$	$1,84 \cdot 10^{-4}$
Mg	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$9,04 \cdot 10^{-5}$	$9,23 \cdot 10^{-5}$	$2,59 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-6}$	$8,87 \cdot 10^{-6}$
Li	$3,12 \cdot 10^{-4}$	$3,44 \cdot 10^{-4}$	$4,83 \cdot 10^{-5}$	$8,20 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{-7}$	$1,58 \cdot 10^{-5}$
Cr	$2,21 \cdot 10^{-4}$	$9,26 \cdot 10^{-5}$	$8,18 \cdot 10^{-5}$	$9,34 \cdot 10^{-6}$	$9,81 \cdot 10^{-7}$	$1,34 \cdot 10^{-5}$
K	1,36	0,47	0,52	$6,31 \cdot 10^{-3}$	$2,96 \cdot 10^{-3}$	$1,42 \cdot 10^{-2}$

⁴ МР 2.3.1.0253-21. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации: методические рекомендации / утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 22 июля 2021 г. [Электронный ресурс] // ГАРАНТ: информационно-правовое обеспечение. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402716140/> (дата обращения: 28.10.2025).

⁵ Rodriguez R.E., Kasprzak K.S. Antagonists to metal carcinogens // Journal of the American College of Toxicology. – 1989. – Vol. 8, № 7. – P. 1265–1269. DOI: 10.3109/10915818909009116

Таблица 4

Неканцерогенный риск металлов (коэффициенты опасности, HQ) при потреблении тканей промысловых рыб из Горьковского водохранилища

Металл	Мышечная ткань			Гонады		
	Лещ	Судак	Чехонь	Лещ	Судак	Чехонь
Cd	0,0008	0,0005	0,0019	0,000017	0,000004	0,000051
Pb	0,0071	0,0041	0,0232	0,000132	0,000036	0,000242
Al	0,0058	0,0023	0,0040	0,000388	0,000050	0,000881
Co	0,0071	0,0019	0,0036	0,000163	0,000104	0,000405
Ni	0,0012	0,0006	0,0009	0,000015	0,000004	0,000019
Zn	0,0096	0,0014	0,0136	0,001467	0,000102	0,001645
Cu	0,0118	0,0039	0,0035	0,000384	0,000034	0,000224
Mn	0,0014	0,0002	0,0010	0,000066	0,000041	0,000123
Fe	0,0102	0,0007	0,0027	0,000114	0,000035	0,000263
Li	0,0156	0,0172	0,0024	0,000410	0,000005	0,000789
Cr	0,0736	0,0309	0,0273	0,003114	0,000327	0,004466

Индекс опасности развития неканцерогенных эффектов HI для групп веществ с однонаправленным действием, влияющих на почки, эндокринную систему, кровь, ЖКТ, нервную систему, оказался минимальным – менее 1,0.

Канцерогенные риски (CRi) от канцерогенных металлов изменялись в пределах нескольких порядков: от 10^{-9} для Pb до 10^{-4} для Cr (табл. 5).

Риск возникновения рака при потреблении мяса всех исследованных видов из Горьковского водохранилища отдельно от Cr, а при потреблении мяса леща и чехони от Cd превышал 1 на 100 000. Кроме этого, значение CR при употреблении мяса леща превышало уровень ($> 1 \cdot 10^{-4}$), при этом наибольший канцерогенный риск от суммарного воздействия металлов установлен для сценария употребления мяса и половых гонад леща одновременно ($1,28 \cdot 10^{-4}$) [1, 31].

Кадмий и свинец – тяжелые металлы, которые чужеродны для организма живых существ. Они не участвуют в биохимических процессах, происходящих при нормальном функционировании организма [31, 32]. Cd и Pb способствуют развитию сахарного диабета 2-го типа и онкологических заболеваний; характеризуются широким спектром неблагоприятного влияния на почки, зрение, нервную, костную и сердечно-сосудистую системы [33]. Хром, у которо-

го установлен потенциальный канцерогенный эффект, может вызывать поражение печени, почек и легких, а также влиять на метаболизм липидов и сахара [1, 34].

Наиболее безопасным с точки зрения здоровья взрослого населения по показателям неканцерогенного и канцерогенного рисков является потребление мяса судака. Учитывая, что мышцы судака являются источником ценного белка, потребление его мяса будет приносить пользу человеку [11].

Оценка риска здоровью подразумевает под собой оценку неопределенности [35]. В данном исследовании неопределенность главным образом связана с усредненной информацией о потреблении рыбы и отсутствии сведений об использовании мяса гидробионтов в пищу различными группами населения в исследованном регионе. Кроме этого, металлы определялись в сырой рыбе, однако считается, что кулинарная обработка может приводить к изменению биодоступности элементов [26]. В нашей работе проведена оценка риска здоровью человека от воздействия нескольких металлов, но в тканях рыб могут содержаться другие канцерогены, которые мы не учитывали. Дополнительная неопределенность может вытекать из ошибок анализа, чувствительности и точности применяемых методик. Тем не менее, даже с учетом этих неопределенностей, результаты,

Таблица 5

Показатели канцерогенных рисков от потребления тканей промысловых рыб из Горьковского водохранилища

Вид	CRi			CR
	Cd	Pb	Cr	
<i>Мышцы</i>				
Лещ	$1,22 \cdot 10^{-5}$	$2,12 \cdot 10^{-7}$	$1,10 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$
Судак	$7,36 \cdot 10^{-6}$	$1,23 \cdot 10^{-7}$	$4,63 \cdot 10^{-5}$	$5,38 \cdot 10^{-5}$
Чехонь	$2,85 \cdot 10^{-5}$	$6,91 \cdot 10^{-7}$	$4,09 \cdot 10^{-5}$	$7,01 \cdot 10^{-5}$
<i>Гонады</i>				
Лещ	$2,50 \cdot 10^{-7}$	$3,94 \cdot 10^{-9}$	$4,67 \cdot 10^{-6}$	$4,93 \cdot 10^{-6}$
Судак	$5,62 \cdot 10^{-8}$	$1,07 \cdot 10^{-9}$	$4,91 \cdot 10^{-7}$	$5,48 \cdot 10^{-7}$
Чехонь	$7,63 \cdot 10^{-7}$	$7,21 \cdot 10^{-9}$	$6,70 \cdot 10^{-6}$	$7,47 \cdot 10^{-6}$

Примечание: CRi – канцерогенный риск, CR – кумулятивный канцерогенный риск.

полученные в данном исследовании, предоставляют важную информацию о вероятном риске для здоровья человека, связанном с воздействием металлов при употреблении в пищу промысловых рыб Горьковского водохранилища, а особенности элементного состава тканей рыб можно использовать для мониторинга состояния популяций и водной среды.

Выводы. В тканях всех исследованных особей содержание эссенциальных элементов оказалось выше, чем неэссенциальных, исключение составил алюминий. Полученные значения суточного поступления металлов из тканей промысловых рыб не превышали значения допустимого суточного поступления и рекомендованной суточной нормы для взрослого населения.

Значения показателей неканцерогенного риска, формируемого отдельными металлами, соответствовали минимальному уровню риска. Неканцерогенный риск формирования нарушений функций органов и систем органов при воздействии веществ с односторонним действием оказался также минимальным. Уровень суммарного канцерогенного риска при употреблении в пищу отдельно гонад всех

видов минимален, мяса судака и чехони – приемлем, но подлежит постоянному контролю, мяса леща – неприемлем для населения. Наибольший канцерогенный риск от суммарного воздействия металлов установлен для сценария употребления мяса и половых гонад леща одновременно.

Проведенное исследование показывает необходимость разработки профилактических мероприятий, направленных на оздоровление Горьковского водохранилища, и информирования населения о рисках здоровью с рекомендациями ограничения употребления мяса леща. Элементный состав тканей леща, чехони и судака может использоваться в качестве ориентировочных показателей содержания металлов при мониторинге водной среды и состояния популяций этих видов.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Государственного задания НИР № FENZ-2023-0004 Министерства науки и высшего образования РФ на период 2023–2027 годов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Bioaccumulation and potential sources of heavy metal contamination in fish species in Taiwan: assessment and possible human health implications / C.T. Vu, C. Lin, G. Yeh, M.C. Villanueva // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* – 2017. – Vol. 24, № 23. – P. 19422–19434. DOI: 10.1007/s11356-017-9590-4
2. Bošković N., Joksimović D., Bajt O. Content of trace elements and human health risk assessment via consumption of commercially important fishes from Montenegrin coast // *Foods.* – 2023. – Vol. 12, № 4. – P. 762. DOI: 10.3390/foods12040762
3. Heavy Metal Concentrations and Potential Human Health Risk for Consuming Gills, Muscles, Liver and Gonads of Silver Catfish (*Chrysichthys nigrodigitatus*) Reaped from Great Kwa River, Calabar, Cross River State, Nigeria / E.M. Ayim, N.O. Sam-Uket, J.T. Onejeme, I.O. Owali // *J. Appl. Sci. Environ. Manag.* – 2024. – Vol. 28, № 12. – P. 3973–3982. DOI: 10.4314/jasem.v28i12.4
4. Investigation of the effects of heavy metals (copper, cobalt, manganese, selenium, and zinc) on fish immune systems – An overview / S. Bagheri, A. Gholamhosseini, S.H. Hoseinifar, M. Banaee // *Ann. Anim. Sci.* – 2024. – Vol. 24, № 4. – P. 1025–1035. DOI: 10.2478/aoas-2024-0017
5. Payuta A.A., Flerova E.A., Zaitseva Yu.V. Distribution of Essential and Toxic Elements in *Pelecus cultratus* Tissues and Risk Assessment for Consumer Health // *Toxics.* – 2023. – Vol. 11, № 8. – P. 715. DOI: 10.3390/toxics11080715
6. Toxic metals and metalloids in infant formulas marketed in Brazil, and child health risks according to the target hazard quotients and target cancer risk / C.C. de Almeida, D. Dos Santos Baião, P. de Almeida Rodrigues, T. Dillenburg Saint’Pierre, R.A. Hauser-Davis, K.C. Leandro, V.M.F. Paschoalin, M.P. da Costa, C.A. Conte-Junior // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* – 2022. – Vol. 19, № 18. – P. 11178. DOI: 10.3390/ijerph191811178
7. Качество поверхностных вод Российской Федерации: Ежегодник 2022 / под ред. М.М. Трофимчука. – Ростов-на-Дону: ФГБУ «Гидрохимический институт», 2023. – 613 с.
8. Томилина И.И., Ложкина Р.А., Гапеева М.В. Оценка качества воды Горьковского водохранилища (р. Волга, Россия) по данным биотестирования и химического анализа // *Трансформация экосистем.* – 2025. – Т. 8, № 1. – С. 145–160. DOI: 10.23859/estr-230403
9. Lozhkina R.A., Tomilina I.I. Ecological and Toxicological Status of Bottom Sediments of the Gorki Reservoir (According to Biotesting and Chemical Analysis Data) // *Inland Water Biol.* – 2025. – Vol. 18. – P. 232–244. DOI: 10.1134/S1995082924600935
10. Минин А.Е., Катаев Р.К., Постнов Д.И. Характеристика и динамика запасов основных промысловых видов рыб, их освоение и перспективы вылова на Горьковском водохранилище // *Вопросы рыболовства.* – 2023. – Т. 24, № 3. – С. 141–160. DOI: 10.36038/0234-2774-2023-24-3-141-160
11. 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 // *J. Ichthyol.* – 2019. – Vol. 59, № 2. – P. 255–262. DOI: 10.1134/S0032945219020152
12. Мищенко А.В., Битютская О.Е., Лавриненко О.И. Предварительные маркетинговые исследования ассортимента рынка икры частиковых рыб // *Образование, наука и молодежь-2018: сборник трудов по материалам научно-практических конференций ФГБОУ ВО «КГМУ» / под ред. Е.П. Масюткина.* – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2018. – С. 25–30.
13. Estimation of target hazard quotients and potential health risks for toxic metals and other trace elements by consumption of female fish gonads and testicles / K. Pokorska-Niewiada, A. Witczak, M. Protasowicki, J. Cybulski // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* – 2022. – Vol. 19, № 5. – P. 2762. DOI: 10.3390/ijerph19052762

14. Разработка комплексного подхода к оценке содержания элементных контаминантов в нативных продуктах на основе лекарственного растительного сырья и его применение к семенам тыквы / С.В. Овсиенко, Н.Е. Кузьмина, В.М. Шукин, Е.А. Хорольская // Вестник Научного центра экспертизы средств медицинского применения. Регуляторные исследования и экспертиза лекарственных средств. – 2022. – Т. 12, № 2. – С. 149–160. DOI: 10.30895/1991-2919-2022-12-2-149-160
15. Price P.S. The Hazard index at thirty-seven: new science new insights // Curr. Opin. Toxicol. – 2023. – Vol. 34. – P. 100388. DOI: 10.1016/j.cotox.2023.100388
16. Determination of heavy metals in muscle tissue of six fish species with different feeding habits from the Danube River, Belgrade – public health and environmental risk assessment / D.A. Jovanović, R.V. Marković, V.B. Teodorović, D.S. Šefer, M.P. Krstić, S.B. Radulović, J.S. Ivanović Ćirić, J.M. Janjić, M.Ž. Baltić // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. – 2017. – Vol. 24, № 12. – P. 11383–11391. DOI: 10.1007/s11356-017-8783-1
17. Ali H., Khan E. Bioaccumulation of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in freshwater fish. Risk to human health // Environ. Chem. Lett. – 2018. – Vol. 16. – P. 903–917. DOI: 10.1007/s10311-018-0734-7
18. Effects on heavy metal accumulation in freshwater fishes: species, tissues, and sizes / Y. Jia, L. Wang, Z. Qu, C. Wang, Z. Yang // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. – 2017. – Vol. 24, № 10. – P. 9379–9386. DOI: 10.1007/s11356-017-8606-4
19. Науменко Е.Н., Хлопников М.М., Рудинская Л.В. Потоки энергии в экосистеме Вислинского (Калининградского) залива Балтийского моря // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. – 2012. – Т. 5, № 2. – С. 184–202.
20. Prysiazniuk N., Slobodeniuk O., Horchanok A. Nutrition and fodder relations of *Pelecus cultratus* (L.) in Kremenchuk reservoir // Prospects and achievements in applied and basic sciences: Abstracts of IV International Scientific and Practical Conference. – Hungary, Budapest, February 9–12, 2021. – P. 22–24.
21. Use of fish as bio-indicator of the effects of heavy metals pollution / M.M. Authman, M.S. Zaki, E.A. Khallaf, H.H. Abbas // J. Aquac. Res. Dev. – 2015. – Vol. 6, № 4. – P. 1–13. DOI: 10.4172/2155-9546.1000328
22. Water temperature and acid pH influence the cytotoxic and genotoxic effects of aluminum in the freshwater teleost *Astyanax altiparanae* (Teleostei: characidae) / J.P.S. Pinheiro, C.B. de Assis, M. Munoz-Penuela, F. Barbosa Junior, T.G. Correia, R.G. Moreira // Chemosphere. – 2019. – Vol. 220. – P. 266–274. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.12.143
23. Epigenetic mechanisms of Aluminum-Induced neurotoxicity and Alzheimer's disease: A focus on Non-Coding RNAs / M. Aschner, A.V. Skalny, A. Santamaria, J.B.T. Rocha, B. Mansouri, Y. Tizabi, R. Madeddu, R. Lu [et al.] // Neurochem. Res. – 2024. – Vol. 49, № 11. – P. 2988–3005. DOI: 10.1007/s11064-024-04214-9
24. Aluminium (from all sources, including food additives) // In book: Evaluation of certain food additives and contaminants: sixty-seventh report of the Joint FAO/ WHO Expert Committee on Food Additives: WHO Technical Report Series. – 2007. – № 940. – P. 33–45.
25. Institute of Medicine (US) Panel on Micronutrients. Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc. – Washington (DC): National Academies Press, 2001. – 773 p. DOI: 10.17226/10026
26. Biological responses related to agonistic, antagonistic and synergistic interactions of chemical species / T. García-Barrera, J.L. Gómez-Ariza, M. González-Fernández, F. Moreno, M.A. García-Sevillano, V. Gómez-Jacinto // Anal. Bioanal. Chem. – 2012. – Vol. 403, № 8. – P. 2237–2253. DOI: 10.1007/s00216-012-5776-2
27. Hair toxic element content in adult men and women in relation to body mass index / M.G. Skalnaya, A.A. Tinkov, V.A. Demidov, E.P. Serebryansky, A.A. Nikonov, A.V. Skalny // Biol. Trace Elem. Res. – 2014. – Vol. 161, № 1. – P. 13–19. DOI: 10.1007/s12011-014-0082-9
28. Mucociliary transport as a link between chronic rhinosinusitis and trace element dysbalance / S.I. Alekseenko, A.V. Skalny, O.P. Ajsuvakova, M.G. Skalnaya, S.V. Notova, A.A. Tinkov // Med. Hypotheses. – 2019. – Vol. 127. – P. 5–10. DOI: 10.1016/j.mehy.2019.03.007
29. Effect of Zn supplementation on trace element status in rats with diet-induced non-alcoholic fatty liver disease / E.R. Gatiatulina, E.A. Sheina, O.N. Nemereshina, E.V. Popova, V.S. Polyakova, E.F. Agletdinov, A.I. Sinitskii, A.V. Skalny [et al.] // Biol. Trace Elem. Res. – 2020. – Vol. 197, № 1. – P. 202–212. DOI: 10.1007/s12011-019-01985-z
30. Кожин А.А., Владимирский Б.М. Микроэлементозы в патологии человека экологической этиологии. Обзор литературы // Экология человека. – 2013. – № 9. – С. 56–64.
31. Residual levels of mercury, cadmium, lead and arsenic in some commercially key species from Italian coasts (Adriatic Sea): Focus on human health / G. Barone, A. Storelli, R. Garofalo, R. Mallamaci, M.M. Storelli // Toxics. – 2022. – Vol. 10, № 5. – P. 223. DOI: 10.3390/toxics10050223
32. Alipour H., Banagar Gh.R. Health risk assessment of selected heavy metals in some edible fishes from Gorgan Bay, Iran // Iran. J. Fish. Sci. – 2018. – Vol. 17, № 1. – P. 21–34. DOI: 10.22092/IJFS.2018.115582
33. Retinal toxicity of heavy metals and its involvement in retinal pathology / M. Aschner, A.V. Skalny, M.M.B. Paoliello, M.N. Tinkova, A.C. Martins, A. Santamaria, E. Lee, J.B.T. Rocha [et al.] // Food Chem. Toxicol. – 2024. – Vol. 188. – P. 114685. DOI: 10.1016/j.fct.2024.114685
34. Accumulation of chromium in plants and its repercussion in animals and humans / R.T. Kapoor, M.F.B. Mfarrej, P. Alam, J. Rinklebe, P. Ahmad // Environ. Pollut. – 2022. – Vol. 301. – P. 119044. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119044
35. Анализ риска здоровью в стратегии государственного социально-экономического развития: монография в 2 т. / Г.Г. Онищенко, Н.В. Зайцева, А.Ю. Попова, И.В. Май, О.Ю. Устинова, П.В. Трусов, Т.Х.Х. Ле, С.В. Клейн [и др.]; под ред. Г.Г. Онищенко, Н.В. Зайцевой. – М.; Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2024. – Т. 1. – 580 с.

Паюта А.А., Флёрова Е.А., Зайцева Ю.В. Оценка риска для здоровья человека при потреблении промысловых рыб Горьковского водохранилища // Анализ риска здоровью. – 2026. – № 1. – С. 54–64. DOI: 10.21668/health.risk/2026.1.05



Research article

ASSESSMENT OF HUMAN HEALTH RISKS CAUSED BY CONSUMPTION OF COMMERCIAL FISH CAUGHT IN THE GORKY RESERVOIR

A.A. Payuta, E.A. Flerova, Y.V. Zaitseva

P.G. Demidov Yaroslavl State University, 14 Sovetskaya Str., Yaroslavl, 150003, Russian Federation

Research objects were represented by bream, zander, and sabrefish as valuable commercial fish species from the Gorky Reservoir. The aim of the study was to determine the elemental composition of the muscle tissue and gonads of fish from the Gorky Reservoir and to assess the human health risks associated with consuming this fish.

Fish was caught by trawl at the stations in the reservoir. Muscle tissue and gonads were selected for analysis, weighed, and frozen at -18°C until analysis. In the laboratory, the tissues were dried at 60°C to constant mass, ground in a laboratory mill, and then ashed in a muffle furnace at 550°C . Cd, Pb, Al, Co, Ni, Zn, Cu, Li, Cr, and V were determined in the samples using an Agilent 7500 inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS) (USA), and Mn, Fe, and Mg were determined using a KVANT 2-AT spectrophotometer (Kortec Ltd., Moscow, Russian Federation). Potassium content was determined using flame emission spectrometry. Fish consumption was calculated based on FAO data, taking into account the mass fraction of meat and gonads.

Assessment of the associated human health risks involved calculating the hazard coefficient, the cumulative risk, the chronic daily intake of metals, the cancer risk, and the total cancer risk. Elevated contents of several metals were found in sabrefish tissues relative to bream and zander. This may be due to a wider feeding spectrum of this species. The obtained values of the daily intake of metals from the tissues of the examined fish did not exceed the tolerable daily intake and the recommended daily allowance for the adult population. The values of the target hazard quotient and the total hazard index for all elements did not exceed the permissible threshold. The value of the total target cancer risk caused by consuming bream meat exceeded permissible levels. Non-carcinogenic and carcinogenic risk indicators were higher for consuming bream tissues relative to zander and sabrefish tissues.

Our findings can be used for informing the population about potential health risks caused by consumption of local commercial fish species caught in the Gorky Reservoir.

Keywords: heavy metals, bream, zander, sabrefish, Gorky Reservoir, non-carcinogenic risk, carcinogenic risk.

References

1. 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. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 2017, vol. 24, no. 23, pp. 19422–19434. DOI: 10.1007/s11356-017-9590-4
2. Bošković N., Joksimović D., Bajt O. Content of trace elements and human health risk assessment via consumption of commercially important fishes from Montenegrin coast. *Foods*, 2023, vol. 12, no. 4, pp. 762. DOI: 10.3390/foods12040762
3. Ayim E.M., Sam-Uket N.O., Onejeme J.T., Owali I.O. Heavy Metal Concentrations and Potential Human Health Risk for Consuming Gills, Muscles, Liver and Gonads of Silver Catfish (*Chrysichthys nigrodigitatus*) Reaped from Great Kwa River, Calabar, Cross River State, Nigeria. *J. Appl. Sci. Environ. Manag.*, 2024, vol. 28, no. 12, pp. 3973–3982. DOI: 10.4314/jasem.v28i12.4
4. Bagheri S., Gholamhosseini A., Hoseinifar S.H., Banaee M. Investigation of the effects of heavy metals (copper, cobalt, manganese, selenium, and zinc) on fish immune systems – An overview. *Ann. Anim. Sci.*, 2024, vol. 24, no. 4, pp. 1025–1035. DOI: 10.2478/aoas-2024-0017
5. Payuta A.A., Flerova E.A., Zaitseva Yu.V. Distribution of Essential and Toxic Elements in *Pelecus cultratus* Tissues and Risk Assessment for Consumer Health. *Toxics*, 2023, vol. 11, no. 8, pp. 715. DOI: 10.3390/toxics11080715

© Payuta A.A., Flerova E.A., Zaitseva Y.V., 2026

Aleksandra A. Payuta – Candidate of Biological Sciences, Researcher at Scientific Laboratory of Eco-biomonitoring and Quality Control (e-mail: a.payuta@mail.ru; tel.: +7 (905) 638-94-75; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0478-4709>).

Ekaterina A. Flerova – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at Scientific Laboratory of Eco-biomonitoring and Quality Control (e-mail: katarinum@mail.ru; tel.: +7 (903) 829-01-80; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9745-6746>).

Yuliya V. Zaitseva – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at Scientific Laboratory of Eco-biomonitoring and Quality Control (e-mail: zjv9@mail.ru; tel.: +7 (980) 703-53-01; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9522-010X>).

6. de Almeida C.C., Dos Santos Baião D., de Almeida Rodrigues P., Dillenburg Saint’Pierre T., 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. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2022, vol. 19, no. 18, pp. 11178. DOI: 10.3390/ijerph191811778
7. Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiiskoi Federatsii: Ezhegodnik 2022 [Quality of surface waters in the Russian Federation]. In: M.M. Trofimchuk ed. Rostov-na-Donu, FGBU «Gidrokhimicheskii institut» Publ., 2023, 613 p. (in Russian).
8. Tomilina I.I., Lozhkina R.A., Gapeeva M.V. Water quality assessment in the Gorky Reservoir (Volga River, Russia) based on biotesting and chemical analysis. *Ecosystem Transformation*, 2025, vol. 8, no. 1, pp. 145–160. DOI: 10.23859/estr-230403
9. Lozhkina R.A., Tomilina I.I. Ecological and Toxicological Status of Bottom Sediments of the Gorki Reservoir (According to Biotesting and Chemical Analysis Data). *Inland Water Biol.*, 2025, vol. 18, pp. 232–244. DOI: 10.1134/S1995082924600935
10. Minin A.E., Kataev R.K., Postnov D.I. Stock characteristics, dynamics and efficiency of using of the main commercial fish species, prospects of catching at the Gorky reservoir. *Voprosy rybolovstva*, 2023, vol. 24, no. 3, pp. 141–160. DOI: 10.36038/0234-2774-2023-24-3-141-160 (in Russian).
11. 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. *J. Ichthyol.*, 2019, vol. 59, no. 2, pp. 255–262. DOI: 10.1134/S0032945219020152
12. Mishchenko A.V., Bityutskaya O.E., Lavrinenko O.I. Predvaritel’nye marketingovye issledovaniya assortimenta rynka ikry chastikovykh ryb [Preliminary marketing research of the range of ordinary fish caviar]. *Obrazovanie, nauka i molodezh’-2018: sbornik trudov po materialam nauchno-prakticheskikh konferentsii FGBOU VO «KGMTU» [Education, Science and Youth-2018: collection of papers based on materials of scientific and practical conferences of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «KSMTU»]*. In: E.P. Masyutkin ed. Kerch', FGBOU VO «Kerchenskii gosudarstvennyi morskoi tekhnologicheskii universitet» Publ., 2018, pp. 25–30 (in Russian).
13. Pokorska-Niewiada K., Witczak A., Protasowicki M., Cybulski J. Estimation of target hazard quotients and potential health risks for toxic metals and other trace elements by consumption of female fish gonads and testicles. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2022, vol. 19, no 5, pp. 2762. DOI: 10.3390/ijerph19052762
14. Ovsienko S.V., Kuz'mina N.E., Shchukin V.M., Khorolskaya E.A. Development of a Comprehensive Approach to Assessing the Content of Elemental Contaminants in Native Herbal Medicinal Products, Using Pumpkin Seeds as a Case Study. *Vedomosti Nauchnogo tsentra ekspertizy sredstv meditsinskogo primeneniya. Regulyatornye issledovaniya i ekspertiza lekarstvennykh sredstv*, 2022, vol. 12, no. 2, pp. 149–160. DOI: 10.30895/1991-2919-2022-12-2-149-160 (in Russian).
15. Price P.S. The Hazard index at thirty-seven: new science new insights. *Curr. Opin. Toxicol.*, 2023, vol. 34, pp. 100388. DOI: 10.1016/j.cotox.2023.100388
16. Jovanović D.A., Marković R.V., Teodorović V.B., Šefer D.S., Krstić M.P., Radulović S.B., Ivanović Ćirić J.S., Janjić J.M., Baltić M.Ž. Determination of heavy metals in muscle tissue of six fish species with different feeding habits from the Danube River, Belgrade – public health and environmental risk assessment. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 2017, vol. 24, no. 12, pp. 11383–11391. DOI: 10.1007/s11356-017-8783-1
17. Ali H., Khan E. Bioaccumulation of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in freshwater fish. Risk to human health. *Environ. Chem. Lett.*, 2018, vol. 16, pp. 903–917. DOI: 10.1007/s10311-018-0734-7
18. Jia Y., Wang L., Qu Z., Yang C., Wang Z. Effects on heavy metal accumulation in freshwater fishes: species, tissues, and sizes. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 2017, vol. 24, no. 10, pp. 9379–9386. DOI: 10.1007/s11356-017-8606-4
19. Naumenko E.N., Khlopnikov M.M., Rudynskaya L.V. Energy flows in the Vistula Lagoon of the Baltic Sea. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya*, 2012, vol. 5, no. 2, pp. 184–202 (in Russian).
20. Prysiazhniuk N., Slobodeniuk O., Horchanok A. Nutrition and fodder relations of *Pelecus cultratus* (L.) in Kremenchuk reservoir. *Prospects and achievements in applied and basic sciences: Abstracts of IV International Scientific and Practical Conference*, Budapest, Hungary, February 9–12, 2021, pp. 22–24.
21. Authman M.M., Zaki M.S., Khallaf E.A., Abbas H.H. Use of fish as bio-indicator of the effects of heavy metals pollution. *J. Aquac. Res. Dev.*, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 1–13. DOI: 10.4172/2155-9546.1000328
22. Pinheiro J.P.S., de Assis C.B., Munoz-Penuela M., Barbosa Junior F., Correia T.G., Moreira R.G. Water temperature and acid pH influence the cytotoxic and genotoxic effects of aluminum in the freshwater teleost *Astyanax altiparanae* (Teleostei: characidae). *Chemosphere*, 2019, vol. 220, pp. 266–274. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.12.143
23. Aschner M., Skalny A.V., Santamaria A., Rocha J.B.T., Mansouri B., Tizabi Y., Madeddu R., Lu R. [et al.]. Epigenetic mechanisms of Aluminum-Induced neurotoxicity and alzheimer’s disease: A focus on Non-Coding RNAs. *Neurochem. Res.*, 2024, vol. 49, no. 11, pp. 2988–3005. DOI: 10.1007/s11064-024-04214-9
24. Aluminium (from all sources, including food additives). In book: *Evaluation of certain food additives and contaminants: sixty-seventh report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives: WHO Technical Report Series*, 2007, no. 940, pp. 33–45.
25. Institute of Medicine (US) Panel on Micronutrients. Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc. Washington, DC, National Academies Press, 2001, 773 p. DOI: 10.17226/10026
26. García-Barrera T., Gómez-Ariza J.L., González-Fernández M., Moreno F., García-Sevillano M.A., Gómez-Jacinto V. Biological responses related to agonistic, antagonistic and synergistic interactions of chemical species. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2012, vol. 403, no. 8, pp. 2237–2253. DOI: 10.1007/s00216-012-5776-2
27. Skal'naya M.G., Tinkov A.A., Demidov V.A., Serebryansky E.P., Nikonorov A.A., Skalny A.V. Hair toxic element content in adult men and women in relation to body mass index. *Biol. Trace Elem. Res.*, 2014, vol. 161, no. 1, pp. 13–19. DOI: 10.1007/s12011-014-0082-9

28. Alekseenko S.I., Skalny A.V., Ajsuvakova O.P., Skalnaya M.G., Notova S.V., Tinkov A.A. Mucociliary transport as a link between chronic rhinosinusitis and trace element dysbalance. *Med. Hypotheses*, 2019, vol. 127, pp. 5–10. DOI: 10.1016/j.mehy.2019.03.007
29. Gatiatulina E.R., Sheina E.A., Nemereshina O.N., Popova E.V., Polyakova V.S., Agletdinov E.F., Sinitskii A.I., Skalny A.V. [et al.]. Effect of Zn supplementation on trace element status in rats with diet-induced non-alcoholic fatty liver disease. *Biol. Trace Elem. Res.*, 2020, vol. 197, no. 1, pp. 202–212. DOI: 10.1007/s12011-019-01985-z
30. Kozhin A.A., Vladimirov B.M. Microelementoses in human pathology of ecological etiology (Literature Review). *Ekologiya cheloveka*, 2013, no. 9, pp. 56–64 (in Russian).
31. 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, pp. 223. DOI: 10.3390/toxics10050223
32. Alipour H., Banagar Gh.R. Health risk assessment of selected heavy metals in some edible fishes from Gorgan Bay, Iran. *Iran. J. Fish. Sci.*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 21–34. DOI: 10.22092/IJFS.2018.115582
33. Aschner M., Skalny A.V., Paoliello M.M.B., Tinkova M.N., Martins A.C., Santamaria A., Lee E., Rocha J.B.T. [et al.]. Retinal toxicity of heavy metals and its involvement in retinal pathology. *Food Chem. Toxicol.*, 2024, vol. 188, pp. 114685. DOI: 10.1016/j.fct.2024.114685
34. 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. *Environ. Pollut.*, 2022, vol. 301, pp. 119044. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119044
35. Onishchenko G.G., Zaitseva N.V., Popova A.Yu., May I.V., Ustinova O.Yu., Trusov P.V., Le T.H.H., Kleyn S.V. [et al.]. Analiz riska zdorov'yu v strategii gosudarstvennogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya [Health risk analysis in the strategy for the state social and economic development]: monograph in 2 vol. In: G.G. Onishchenko, N.V. Zaitseva eds. Moscow, Perm, PNRPU Publ., 2024, vol. 1, 580 p. (in Russian).

Payuta A.A., Flerova E.A., Zaitseva Y.V. Assessment of human health risks caused by consumption of commercial fish caught in the Gorky reservoir. Health Risk Analysis, 2026, no. 1, pp. 54–64. DOI: 10.21668/health.risk/2026.1.05.eng

Получена: 03.10.2025

Одобрена: 19.02.2026

Принята к публикации: 26.03.2026