

Александра Александровна Паюта^{1✉}, Екатерина Александровна Флерова²,
Юлия Владимировна Зайцева³, Илья Васильевич Злобин⁴

^{1,2,3,4}Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова. Ярославль, Россия

¹a.payuta@mail.ru

²katarinum@mail.ru

³zjv9@mail.ru

⁴ily.zlobin21@yandex.ru

СОДЕРЖАНИЕ МЕТАЛЛОВ В МЫШЦАХ СУДАКА ИЗ ИВАНЬКОВСКОГО И УГЛИЧСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩ: ОЦЕНКА РИСКА ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ, СВЯЗАННОГО С ПОТРЕБЛЕНИЕМ РЫБЫ

Цель исследования – определить содержание металлов в мышцах судака из Ивановского и Угличского водохранилищ и оценить риск потребления мяса этого вида для человека. У особей судака, выловленных тралом на стандартных станциях водохранилищ, иссекали мышечную ткань, взвешивали и замораживали. В лаборатории ткани высушивали, измельчали и определяли содержание Zn, Cu, Mn, Fe, Mg с помощью спектрофотометра KVANT 2-AT; Cd, Pb, Al, Hg, Cr, Co, Ni, V – с помощью ОЭС ИСП Optima 2000 DV; K – с применением пламенно-эмиссионной спектрометрии. Оценка рисков производилась расчетными методами на основании полученных концентраций тяжелых металлов. Мышечная ткань судака из Ивановского водохранилища содержала достоверно больше Cd и Cr и меньше Fe, чем мышцы судака из Угличского водохранилища. Концентрации Hg и V были ниже предела обнаружения. Обнаружена синхронность биоаккумуляции ряда токсичных и эссенциальных металлов в зависимости от их концентрации в воде водохранилищ. Полученное содержание тяжелых металлов не превышало установленные российские ПДК и международные стандарты. Среди проанализированных элементов максимальное накопление в мышцах судака из обоих водохранилищ выявлено для K, Al, Zn и Fe, минимальное – для Co, Cd и Ni. Показатели неканцерогенного риска для здоровья человека от тяжелых металлов не превышали допустимого порога. Риск возникновения рака при потреблении мяса судака от Cd, Al и Cr превышал 1 на 100 000. Общий индекс риска развития рака оказался выше установленных нормативов ($> 1 \cdot 10^{-4}$).

Ключевые слова: судак, *Sander lucioperca*, тяжелые металлы, мышцы судака, Ивановское водохранилище, Угличское водохранилище, коэффициент опасности, канцерогенный риск

Для цитирования: Паюта А.А., Флерова Е.А., Зайцева Ю.В., и др. Содержание металлов в мышцах судака из Ивановского и Угличского водохранилищ: оценка риска для здоровья, связанного с потреблением рыбы // Вестник КрасГАУ. 2025. № 3. С. 89–96. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-3-89-96.

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

Alexandra Alexandrovna Payuta^{1✉}, Ekaterina Aleksandrovna Flerova²,
Yulia Vladimirovna Zaitseva³, Ilya Vasilievich Zlobin⁴

^{1,2,3,4}Yaroslavl State University named after P.G. Demidov, Yaroslavl, Russia

¹a.payuta@mail.ru

²katarinum@mail.ru

³zjv9@mail.ru

⁴ily.zlobin21@yandex.ru

METAL CONTENT IN MUSCLES OF PIKE-PERCH FROM IVANKOVSK AND UGLICH RESERVOIRS: ASSESSMENT OF HEALTH RISKS ASSOCIATED WITH FISH CONSUMPTION

The aim of the study is to determine the metal content in the muscles of pike-perch from the Ivankovsk and Uglich reservoirs and to assess the risk of human consumption of this species. Muscle tissue was excised, weighed and frozen from pike-perch individuals caught by trawl at standard stations of the reservoirs. In the laboratory, the tissues were dried, ground and the content of Zn, Cu, Mn, Fe, Mg was determined using a KVANT 2-AT spectrophotometer; Cd, Pb, Al, Hg, Cr, Co, Ni, V – using an OES ISP Optima 2000 DV; K – using flame emission spectrometry. Risk assessment was carried out using calculation methods based on the obtained concentrations of heavy metals. The muscle tissue of the pike-perch from the Ivankovsk Reservoir contained significantly more Cd and Cr and less Fe than the muscles of the pike-perch from the Uglich Reservoir. The concentrations of Hg and V were below the detection limit. Synchronicity of bioaccumulation of a number of toxic and essential metals depending on their concentration in reservoir water has been discovered. The obtained content of heavy metals did not exceed the established Russian MPCs and international standards. Among the analyzed elements, the maximum accumulation in the muscles of pike-perch from both reservoirs was found for K, Al, Zn and Fe, the minimum – for Co, Cd and Ni. The indicators of non-carcinogenic risk to human health from heavy metals did not exceed the permissible threshold. The risk of cancer when consuming pike-perch meat from Cd, Al and Cr exceeded 1 per 100,000. The overall risk index for cancer development was higher than the established standards ($> 1 \cdot 10^{-4}$).

Keywords: pike-perch, *Sander lucioperca*, heavy metals, pike-perch muscles, Ivankovsk Reservoir, Uglich Reservoir, hazard coefficient, carcinogenic risk

For citation: Payuta AA, Flerova EA, Zaitseva YuV, et al. Metal content in muscles of pike-perch from Ivankovsk and Uglich reservoirs: assessment of health risks associated with fish consumption. *Bulletin of KSAU*. 2025;(3):89-96. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-3-89-96.

Acknowledgments: the work was carried out with the support of the State R&D Assignment № FENZ-2023-0004 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the period 2023–2027.

Введение. Иваньковское и Угличское водохранилища, являясь первым звеном системы водохранилищ Волго-Каспийского бассейна, имеют комплексное значение в деятельности человека. Водоемы используются для судоходства, энергетики, рекреации, сельского и рыбного хозяйства. Кроме того, Иваньковское водохранилище служит главным источником питьевого снабжения Москвы [1–3].

Тверская и Московская области, на территории которых расположены водохранилища, являются густонаселенными и активно застраиваемыми зонами [2]. В них сосредоточено промышленное производство (машиностроительное, химическое,

топливное, пищевое и др.) [4]. Из-за этого водоемы испытывают огромную антропогенную нагрузку. К основным причинам загрязнения водохранилищ относят хозяйственно-бытовые, промышленные, сельскохозяйственные и ливневые сточные воды, вместе с которыми поступают тяжелые металлы – вещества, накапливающиеся в гидробионтах и поступающие в организм человека по пищевой цепи [5, 6].

В рыбных запасах водохранилищ одним из наиболее ценных и массовых видов рыб является судак *Sander lucioperca*. Он характеризуется широким распространением по всем водоемам [7].

Цель исследования – определение концентрации токсичных и эссенциальных металлов в мышцах судака из Ивановского и Угличского водохранилищ и оценка рисков потребления мяса этого вида.

Задачи: выявить особенности аккумуляции микро- и макроэлементов в мышцах судака из Верхневолжских водохранилищ и определить показатели неканцерогенного и канцерогенного рисков для здоровья человека; сравнить полученные результаты с допустимыми нормативами.

Объекты и методы. Объектом исследования были особи судака, выловленные тралом в нагульный период на стандартных станциях траления Ивановского (n = 11) и Угличского (n = 14) водохранилищ. У пойманных рыб на хладагенте иссекали мышечную ткань вдоль позвоночника, взвешивали и замораживали до проведения анализов.

В лаборатории ткани высушивали до постоянной массы при температуре 60 °С, измельчали в лабораторной мельнице, затем приготавливали минерализат для определения металлов. Анализ образцов проводили с помощью спектрофотометра KVANT 2-AT (Kortec Ltd., Moscow, Russia) для получения цинка (Zn), меди (Cu), марганца (Mn), железа (Fe), магния (Mg) и оптического эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Optima 2000DV для получения кадмия (Cd), свинца (Pb), алюминия (Al), ртути (Hg), хрома (Cr), кобальта (Co), никеля (Ni), ванадия (V). Содержание калия (K)

определяли с применением пламенно-эмиссионной спектрометрии. Полученные результаты выражали в мг/кг сырого веса.

Для оценки неканцерогенного и канцерогенного риска потребления мяса судака в пищу использовали метод, описанный ранее [8]. Суточное потребление рыбы в РФ, по данным FAO, для пелагических рыб составляло 0,015 кг/день. Эталонная преоральная доза (RfD) для Zn, Ni и Cu составляла 0,3, 0,02 и 0,04 мг/кг/день соответственно [9].

Статистическую обработку полученных результатов проводили в программе MS Excel с расчетом средних значений и их стандартного отклонения ($\bar{x} \pm SD$). Для оценки достоверности различий между средними значениями применяли непараметрический критерий U-Манна-Уитни. Различия считались статистически значимыми при $P \geq 0,95$.

Результаты и их обсуждение. В результате исследования выявлено статистически достоверное превышение Cd в мышцах судака из Ивановского водохранилища по сравнению с Угличским водохранилищем (табл. 1). Статистически значимых различий между Pb и Al в тканях исследованных особей не обнаружено. Содержание Hg оказалось ниже предела обнаружения.

Мышцы судака из Угличского водохранилища содержали достоверно меньше хрома и больше железа, чем мышцы судака из Ивановского водохранилища (табл. 2).

Таблица 1

Содержание неэссенциальных тяжелых металлов в мышцах судака, мг/кг
The content of nonessential heavy metals in walleye muscles, mg/kg

Водохранилище	Cd	Pb	Al	Hg
Иваньковское	0,024±0,019	0,165±0,103	19,756±7,680	НПО
Угличское	0,011±0,002*	0,130±0,050	19,697±12,593	НПО

Здесь и далее: НПО – ниже предела обнаружения; (*) – отличия от Ивановского водохранилища достоверны.

Таблица 2

Содержание эссенциальных микро- и макроэлементов в мышцах судака, мг/кг
The content of essential micro- and macronutrients in the muscles of the vessel, mg/kg

Водохранилище	Cr	Co	Ni	V	Zn	Cu	Mn	Fe	Mg	K
Иваньковское	0,180±0,083	НПО	0,039±0,041	НПО	3,879±0,217	0,939±0,257	0,134±0,021	0,947±0,659	0,429±0,180	3485±1032
Угличское	0,118±0,054*	0,002±0,003	0,011±0,019	НПО	4,252±0,402	0,898±0,590	0,159±0,064	1,502±0,552*	0,447±0,121	3949±717

Выявлено незначительное превышение содержания цинка, марганца, магния и калия в мышцах судака из Угличского водохранилища по сравнению с Ивановским. Содержание V в обоих водохранилищах и Co в Ивановском водохранилище было ниже предела обнаружения.

Считается, что основное воздействие на гидрхимический режим Угличского водохранилища оказывают воды, поступающие из Ивановского водохранилища [3]. Воды Ивановского и Угличского водохранилищ ранее оценивались как «загрязненные» и «очень загрязненные» [10]. В Ивановском водохранилище отмечают превышение нормативов по содержанию в воде меди, цинка и железа [11]. В водах Угличского водохранилища концентрации железа, марганца, меди и цинка превышают ПДК в несколько раз [5]. Содержание Cd и Al в донных отложениях Ивановского водохранилища было выше, чем в Угличском, Pb – ниже [12, 13].

Сравнение полученных нами данных и сведений о накоплении металлов в воде Ивановского и Угличского водохранилищ свидетельствует о синхронности биоаккумуляции эссенциальных элементов (за исключением Mn) в зависимости от их количества в водной массе. Схожая тенденция выявлена для кадмия и свинца [5, 11–14].

Тяжелые металлы, содержащиеся в мышцах судака из Ивановского и Угличского водохранилищ, не превышали установленные российские ПДК и международные стандарты [15].

В Ивановском водохранилище выявлена следующая закономерность интенсивности на-

копления металлов: Hg = V = Co < Cd < Ni < Mn < Pb < Cr < Mg < Cu < Fe < Zn < Al < K, в то время как в Угличском металлы накапливались в ряду Hg = V < Co < Cd = Ni < Cr < Pb < Mn < Mg < Cu < Fe < Zn < Al < K.

В мышечной ткани судака из обоих водохранилищ такие элементы, как K, Al, Zn, Fe и Cu, превосходили остальные исследованные вещества. При этом концентрация K была выше в несколько тысяч раз, чем остальных элементов. Эти металлы, за исключением Al, являются жизненно необходимыми для живых организмов и называются эссенциальными. В норме они должны накапливаться в больших количествах из-за их важной роли в работе биологических систем (ферментативной, метаболической, регуляторной и других) [16, 17]. Их дефицит может приводить к нарушению метаболических функций, опосредованных ферментами, врожденным аномалиям, иммунологическим нарушениям, хроническим заболеваниям [16, 18]. Калий является очень важным минеральным компонентом для организма, который участвует в кислотно-щелочном балансе, реакции гликогенеза, регуляции осмотического давления, проведении нервных импульсов, сокращении мышц [19]. Алюминий – неэссенциальный металл, однако его биоаккумуляция в рыбах происходит при высоком содержании его взвешенных форм в воде [20].

Значения целевого и суммарного коэффициентов опасности, характеризующие неканцерогенные риски от продолжительного воздействия тяжелых металлов, представлены в таблице 3.

Таблица 3

Показатели неканцерогенного риска от тяжелых металлов в мышцах судака для здоровья человека
Non-carcinogenic risk indicators of heavy metals in pike perch muscle for human health

Водохранилище	Целевой коэффициент опасности (THQ)										HI
	Cd	Pb	Al	Cr	Cu	Mn	Fe	Co	Zn	Ni	
Иваньковское	0,005	0,010	0,004	0,013	0,005	0,0002	0,0003	–	0,003	0,0004	0,041
Угличское	0,002	0,008	0,004	0,008	0,005	0,0002	0,0005	0,0011	0,003	0,0001	0,033

Примечание: HI – суммарный коэффициент опасности.

Результаты исследования показали, что показатели THQ и HI для всех металлов не превышали допустимого порога (< 1), что демонстрирует отсутствие потенциального неканцерогенного риска для здоровья человека при потреблении

мяса судака из Ивановского и Угличского водохранилищ в пищу в течение жизни [6].

Наименьшее значение целевого индекса риска развития рака (TR) определено для Pb (< 1 · 10⁻⁶) (табл. 4).

**Показатели канцерогенного риска для здоровья человека от тяжелых металлов
в мышцах судака**
Indicators of carcinogenic risk to human health from heavy metals in walleye muscles

Водохранилище	Целевой индекс риска развития рака (<i>TR</i>)				<i>TTR</i>
	Cd	Pb	Al	Cr	
Иваньковское	$7,66 \cdot 10^{-5}$	$3,00 \cdot 10^{-7}$	$8,89 \cdot 10^{-5}$	$1,93 \cdot 10^{-5}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$
Угличское	$3,63 \cdot 10^{-5}$	$2,37 \cdot 10^{-7}$	$8,86 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$	$1,38 \cdot 10^{-4}$

Примечание: *TTR* – общий индекс риска развития рака.

Однако риск возникновения рака при потреблении мяса судака из Иваньковского и Угличского водохранилищ от остальных металлов превышает 1 на 100 000. Кроме этого, значение *TTR* превосходит общепринятые нормы ($> 1 \cdot 10^{-4}$), что может приводить к возникновению рака от кумулятивного воздействия потенциальных канцерогенов, попадающих в организм человека при потреблении мяса судака как из Иваньковского, так и Угличского водохранилища [9].

Полученные значения показателей неканцерогенного и канцерогенного риска в среднем оказались выше в Иваньковском водохранилище по сравнению с Угличским. Данный факт не противоречит результатам исследований, которые указывают на несколько больший уровень загрязнения Иваньковского водохранилища по сравнению с Угличским [12–14].

Заключение. В работе определены концентрации токсичных и эссенциальных макро- и микроэлементов в мышцах особей судака, выловленных из Иваньковского и Угличского водо-

охранилищ. Мышцы судака из Иваньковского водохранилища содержали достоверно больше Cd и Cr и меньше Fe, чем мышцы судака из Угличского водохранилища. Обнаружена синхронность биоаккумуляции Cd, Pb и эссенциальных элементов (за исключением Mn) в зависимости от их концентрации в воде. Среди проанализированных элементов максимальное накопление выявлено для K, Al, Zn и Fe, минимальное – для Co, Cd и Ni. Концентрации Hg и V были ниже предела обнаружения. Потенциальный неканцерогенный риск для здоровья человека при потреблении мяса судака из Иваньковского и Угличского водохранилищ не выявлен. Целевые значения канцерогенного риска изменялись от $2,37 \cdot 10^{-7}$ для Pb в мышцах судака из Угличского водохранилища до $8,89 \cdot 10^{-5}$ для Al в мышечной ткани рыб из Иваньковского водохранилища. Общий индекс риска развития рака превышает верхнюю границу, установленную нормативами, что может негативно воздействовать на здоровье человека.

Список источников

1. Ланцова И.В. Влияние рекреационного использования на качество воды Иваньковского водохранилища // Вестник РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2009. № 1. С. 42–50.
2. Кирпичев И.А., Григорьева И.Л. Исследование влияния коттеджной застройки береговой зоны Иваньковского водохранилища на качество воды водоема // Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». 2018. № 1 (38). С. 19–25.
3. Григорьева И.Л. Закономерности и факторы формирования зимнего гидрохимического режима Угличского водохранилища // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 2. С. 52–64.
4. Grishantseva E.S., Safronova N.S. Ecological-geochemical assessment of the state of the Volga source of water supply to Moscow // Water Resources. 2012. V. 39. P. 305–321.
5. Тихомиров О.А. Оценка современного загрязнения и качества воды Угличского водохранилища // Вестник Тверского государственного университета. Сер. Химия. 2022. № 1. С. 142–151.

6. Barone G., Storelli A, Garofalo R, et al. 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, № 5. P. 223.
7. Горячев Д.В., Никитенко А.И., Клец Н.Н., и др. Состояние запасов водных биологических ресурсов Ивановского и Угличского водохранилищ // *Вопросы рыболовства*. 2021. Т. 22, № 1. С. 25–37.
8. Паюта А.А., Флерова Е.А., Зайцева Ю.В. Оценка риска потребления леща из Рыбинского водохранилища // *Вестник КрасГАУ*. 2023. № 12. С. 252–259.
9. Vu C.T., Lin C.H., Yeh G., et al. 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.
10. Трофимчук М.М. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Ростов н/Д.: Гидрохимический институт, 2018. 561 с.
11. Борков Д.Д. Оценка современного качества воды Ивановского водохранилища. В сб.: География, экология, туризм: научный поиск студентов и аспирантов: материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. Тверь: Тверской государственный университет, 2023. С. 11–15.
12. Гапеева М.В., Законнов В.В. Геохимическая характеристика экосистемы Угличского водохранилища // *Труды Института биологии внутренних вод РАН*. 2016. № 75 (78). С. 41–46.
13. Томилина И.И., Гапеева М.В., Ложкина Р.А. Оценка качества воды и донных отложений каскада водохранилищ реки Волга по показателям токсичности и химического состава // *Труды Института биологии внутренних вод РАН*. 2018. № 82 (85). С. 106–130.
14. Гришанцева Е.С., Сафронова Н.С. Эколого-геохимическая оценка состояния Волжского источника водоснабжения г. Москвы // *Водные ресурсы*. 2012. Т. 39, № 3. С. 304–304.
15. Анищенко О.В., Гладышев М.И., Кравчук Е.С., и др. Оценка антропогенного загрязнения р. Енисей по содержанию металлов в основных компонентах экосистемы на участках, расположенных выше и ниже г. Красноярска // *Журнал Сибирского федерального университета. Биология*. 2010. Т. 3, № 1. С. 82–98.
16. Baki MA, Hossain MM, Akter Jh, et al. Concentration of heavy metals in seafood (fishes, shrimp, lobster and crabs) and human health assessment in Saint Martin Island, Bangladesh // *Ecotoxicology and environmental safety*. 2018. V. 159. P. 153-163. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.04.035.
17. Rakocevic J., Sukovic D., Maric D. Distribution and relationships of eleven trace elements in muscle of six fish species from Skadar Lake (Montenegro) // *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2018. V. 18, № 5. P. 647–657.
18. Simionov I.A., Cristea V., Petrea S.M., et al. Bioconcentration of essential and nonessential elements in Black Sea turbot (*Psetta Maxima* Maeotica Linnaeus, 1758) in relation to fish gender // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019. V. 7, № 12. P. 466. DOI: 10.3390/JMSE7120466. EDN: SEMSXR.
19. Soetan K.O., Olaiya C.O., Oyewole O.E. The importance of mineral elements for humans, domestic animals and plants: a review // *African journal of food science*. 2010. V. 4, № 5. P. 200–222.
20. Моисеенко Т.И. Влияние геохимических факторов водной среды на биоаккумуляцию металлов в организме рыб // *Геохимия*. 2015. № 3. С. 222–233. DOI: 10.7868/S0016752515030097. EDN: TJFGMX.

References

1. Lantsova IV. Influence of recreational use on quality of water. *RUDN Journal of Ecology and Life safety*. 2009;(1):42-50. (In Russ.). EDN: JWKDZZ.
2. Kirpichev IL, Grigorieva IL. Investigation of influence of building of the water protection zone of the Ivankovskoye reservoir on water quality of a reservoir. *Vestnik Mezhdunarodnogo universiteta prirody, obshchestva i cheloveka "Dubna"*. 2018;1:19-25. (In Russ.). EDN: FRAOWU.

3. Grigoryeva IL. Regularities and factors of formation of winter hydro/chemical regime of the Uglich reservoir. *Water sector of Russia*. 2020;(2):52-64. (In Russ.). DOI: 10.35567/1999-4508-2020-2-4. EDN: KEWPDY.
4. Grishantseva ES, Safronova NS. Ecological-geochemical assessment of the state of the Volga source of water supply to Moscow. *Water Resources*. 2012;39:305-321. (In Russ.). DOI: 10.1134/S0097807812020054. EDN: PDPDAN.
5. Tikhomirov OA. Assessment of modern pollution and water quality of the Uglich reservoir. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta*. Ser. "Himiya". 2022;(1):142-151. DOI: 10.26456/vtchem 2022.1.15. (In Russ.). EDN: MSTGGM.
6. Barone G, Storelli A, Garofalo R, et al. Residual levels of mercury, cadmium, lead and arsenic in some commercially key species from Italian coasts (Adriatic Sea): Focus on human health. *Toxics*. 2022;10(5):223. DOI: 10.3390/toxics10050223. EDN: TMKHLG.
7. Goryachev DV, Nikitenko AI, Klets NN, et al. State of water biological stock resources in the Ivankovskoe and Uglichchskoe reservoirs. *Voprosy rybolovstva*. 2021;22(1):25-37. (In Russ.). DOI: 10.36038/0234-2774-2021-22-1-25-37. EDN: RYAWVD.
8. Payuta AA, Flerova EA, Zaitseva YuV. Risk assessment of consuming bream from the Rybinsk reservoir. *Bulletin of KSAU*. 2023;(12):252-259. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2023-12-252-259. EDN: VLGQJW.
9. Vu CT, Lin CH, Yeh G, et al. Bioaccumulation and potential sources of heavy metal contamination in fish species in Taiwan: assessment and possible human health implications. *ESPR*. 2017;24:19422-19434. DOI: 10.1007/s11356-017-9590-4. EDN: ELQOMC.
10. Trofimchuk MM. *Kachestvo poverhnostnyh vod Rossijskoj Federacii*. Rostov-on-Don: Gidrohimicheskij institut, 2018. 561 p. (In Russ.).
11. Borkov DD. Ocenka sovremennogo kachestva vody Ivan'kovskogo vodohranilisha. In: *Geografiya, `ekologiya, turizm: nauchnyj poisk studentov i aspirantov: materialy XI Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Tver': Tverskoj gosudarstvennyj universitet, 2023. P. 11–15. (In Russ.). EDN: KUNPAH.
12. Gapeeva MV, Zakonov VV. The geochemical characteristic of the ecosystem of the Uglichsky reservoir. *Trudy Instituta biologii vnutrennih vod RAN*. 2016;75:41-46. (In Russ.). DOI: 10.24411/0320-3557-2016-10019. EDN: YRNVGX.
13. Tomilina II, Gapeeva MV, Lozhkina RA. Assessment of water quality and bottom sediments of the Volga River reservoirs based on toxicity and chemical composition. *Trudy Instituta biologii vnutrennih vod RAN*. 2018;82:106-130. (In Russ.). DOI: 10.24411/0320-3557-2018-1-0015. EDN: LZGUJN.
14. Grishantseva ES, Safronova NS. Ecological-geochemical assessment of the state of the Volga source of water supply to Moscow. *Water Resources*. 2012;39(3):305-321. (In Russ.). EDN: OXXVQH.
15. Anishchenkoa OV, Gladyshev MI, Kravchuk ES. Assessment of the Yenisei River Anthropogenic Pollution by Metals Concentrations in the Main Ecosystem Compartments Upstream and Downstream Krasnoyarsk City (Russia). *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2010;3:82-98. (In Russ.). EDN: MUQADD.
16. Baki MA, Hossain MM, Akter Jh, et al. Concentration of heavy metals in seafood (fishes, shrimp, lobster and crabs) and human health assessment in Saint Martin Island, Bangladesh. *Ecotoxicology and environmental safety*. 2018;159:153-163. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.04.035.
17. Rakocevic J, Sukovic D, Maric D. Distribution and relationships of eleven trace elements in muscle of six fish species from Skadar Lake (Montenegro). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2018;18(5):647-657.
18. Simionov IA, Cristea V, Petrea SM, et al. Bioconcentration of essential and nonessential elements in Black Sea turbot (*Psetta Maxima Maeotica* Linnaeus, 1758) in relation to fish gender. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019;7(12):466. DOI: 10.3390/JMSE7120466. EDN: SEMSXR.

19. Soetan KO, Olaiya CO, Oyewole OE. The importance of mineral elements for humans, domestic animals and plants: a review. *African journal of food science*. 2010;4(5):200-222.
20. Moiseenko TI. Impact of geochemical factors of aquatic environment on the metal bioaccumulation in fish. *Geochemistry International*. 2015;53(3):213-223. (In Russ.). DOI: 10.7868/S0016752515030097. EDN: TJFGMX.

Статья принята к публикации 02.10.2024 / The article accepted for publication 02.10.2024.

Информация об авторах:

Александра Александровна Паюта¹, научный сотрудник лаборатории эковиомониторинга и контроля качества, кандидат биологических наук

Екатерина Александровна Флерова², проректор по научной работе, кандидат биологических наук, доцент

Юлия Владимировна Зайцева³, старший научный сотрудник лаборатории эковиомониторинга и контроля качества, кандидат биологических наук

Илья Васильевич Злобин⁴, младший научный сотрудник лаборатории эковиомониторинга и контроля качества

Information about the authors:

Alexandra Alexandrovna Payuta¹, Researcher at the Laboratory of Ecobiomonitoring and Quality Control, Candidate of Biological Sciences

Ekaterina Aleksandrovna Flerova², Vice-Rector for Research, Candidate of Biological Sciences, Docent

Yulia Vladimirovna Zaitseva³, Senior Researcher, Laboratory of Ecobiomonitoring and Quality Control, Candidate of Biological Sciences

Ilya Vasilievich Zlobin⁴, Junior Researcher, Laboratory of Ecobiomonitoring and Quality Control, Candidate of Biological Sciences

