

Оригинальная статья

УДК 597:574:504.455

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2026-2-219-234>

НАКОПЛЕНИЕ РТУТИ (Hg) В ОРГАНАХ И МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ ПРОМЫСЛОВЫХ ВИДОВ РЫБ ВОДОХРАНИЛИЩ СРЕДНЕЙ ВОЛГИ

А. А. Ревухин^{1,2✉}, Г. В. Шурганова², И. А. Кудрин²,
Р. Е. Воронин², В. А. Гремячих³, В. Т. Комов³

¹ Нижегородский филиал ФГБНУ «ВНИРО»

Россия, 603116, г. Нижний Новгород, Московское шоссе, д. 31

² Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н. И. Лобачевского

Россия, 603950, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, д. 23

³ Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанова РАН

Россия, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок

Поступила в редакцию 23.12.2025 г., после доработки 09.02.2026 г., принята 09.02.2026 г., опубликована 30.07.2026 г.

Аннотация. Проведен сравнительный анализ накопления ртути (Hg) в мышечной ткани и органах промысловых рыб Горьковского и Чебоксарского водохранилищ. Материалом исследования послужили 120 экз. четырёх видов рыб: густеры (*Blicca bjoerkna* L., 1758), леща (*Abramis brama* L., 1758), плотвы обыкновенной (*Rutilus rutilus* L., 1758) и речного окуня (*Perca fluviatilis* L., 1758). Для каждой видовой группы определяли содержание ртути в мышцах, печени, жабрах и гонадах. Результаты показали выраженную видоспецифичность накопления: наибольшие концентрации Hg фиксировались в мышечной ткани и печени, наименьшие – в жабрах и гонадах. Хищный окунь характеризуется более высоким уровнем ртути по сравнению с бентофагами, что определяется его трофическим положением. Корреляционный и ковариационный анализ выявил значимую зависимость концентрации ртути в мышцах от длины тела у большинства видов рыб, тогда как для печени, жабр и гонад эта зависимость была менее выражена и вариабельна. Полученные данные подтверждают информативность мышечной ткани как индикатора долговременного ртутного загрязнения и подчёркивают необходимость учета видового состава и размерно-возрастной структуры при экологическом мониторинге водоёмов.

Ключевые слова: Hg, накопление, пресноводные рыбы, мышечная ткань, печень, жабры, гонады, трофический уровень, Горьковское водохранилище, Чебоксарское водохранилище

✉ Для корреспонденции. Лаборатория водных биологических ресурсов Нижегородского филиала ФГБНУ «ВНИРО».

ORCID и e-mail адреса: Ревухин Александр Андреевич: <https://orcid.org/0009-0003-0370-2059>, revuchin@nizhegorod.vniro.ru; Шурганова Галина Васильевна: <https://orcid.org/0000-0002-0253-6621>, galina.ngu@mail.ru; Кудрин Иван Александрович: <https://orcid.org/0000-0003-2388-629X>, kudriniv@mail.ru; Воронин Роман Евгеньевич: <https://orcid.org/0009-0000-3955-229X>, VRE.2003@yandex.ru; Гремячих Вера Алексеевна: <https://orcid.org/0009-0001-8896-9005>, grva@list.ru; Комов Виктор Трофимович: <https://orcid.org/0000-0001-9124-7428>, vkomov@ibiw.ru

Соблюдение этических норм. Протоколы с использованием животных были одобрены Комиссией по биоэтике Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского (протоколы № 68/1, № 68/2 от 01.03.2023 г.).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ревухин А. А., Шурганова Г. В., Кудрин И. А., Воронин Р. Е., Гремячих В. А., Комов В. Т. Накопление ртути (Hg) в органах и мышечной ткани промысловых видов рыб водохранилищ Средней Волги // Поволжский экологический журнал. 2026. № 2. С. 219 – 234. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2026-2-219-234>

ВВЕДЕНИЕ

Ртуть (Hg) является природным элементом, который относится к числу глобальных загрязнителей благодаря способности к дальнему атмосферному переносу, накоплению в пищевых цепях и выраженному негативному воздействию на здоровье человека и экосистемы (Nriagu, 1979; Fitzgerald et al., 2007; Mason et al., 2009).

В водных экосистемах её присутствие в различных химических и физико-химических формах определяют сложные процессы миграции и накопления в организмах гидробионтов, при этом наибольшую опасность представляет метилртуть (Cai et al., 1997; Siciliano et al., 2003). Метилртуть легко накапливается в рыбах, биоаккумулируется и биомагнифицируется в пищевых цепях, оказывая значительное влияние на состояние гидробионтов и здоровье человека при употреблении рыбы (Мур, Рамамурти, 1987; Немова и др., 2014; Горбачев, 2016; Попов и др., 2019; Swain et al., 1992; Friedmann et al., 2002; Gochfeld, 2003; Visnjaves et al., 2014; Morcillo et al., 2017; Fioravanti et al., 2025). Ввиду крайне низкого содержания металла в воде, потенциальную опасность ртути можно выявить преимущественно при изучении ее содержания в тканях рыб (Мур, Рамамурти, 1987).

Результаты ранее проведенных исследований в России и за рубежом показали, что содержание ртути в органах и мышечной ткани рыб определяется видовой принадлежностью, трофическим положением, размерно-возрастными характеристиками и условиями среды обитания (Немова, 2005; Немова и др., 2014; Wiener et al., 2003; Ali, Khan, 2019). При этом мышцы и печень, как правило, содержат более значительные концентрации металла по сравнению с другими органами, а уровни могут различаться в зависимости от водоёма и вида рыбы (Степанова, Комов, 1997; Колесников, Бойченко, 2012; Немова и др., 2014; Моисеенко, Гашкина, 2016; Горбунов и др., 2018; Шувырденков и др., 2018; Гремячих и др., 2019; Попов и др., 2019; Баженова и др., 2024; Svobodova et al., 1999).

Немаловажную роль играет также оценка взаимосвязи содержания Hg в мышечной ткани и органах рыб с их длиной (и возрастом). Мышцы являются основным депо для долговременного накопления ртути у рыб, поскольку этот металл прочно связывается с мышечными белками (преимущественно с сульфгидрильными группами мышечных протеинов) и практически не выводится из данной ткани

(Bloom, 1992). Связь между содержанием ртути в мышечной ткани рыб и размерно-возрастных характеристик показана в ряде работ (Комов и др., 2004; Тропин и др., 2019; Гремячих и др., 2012, 2024; Паюта и др., 2024; Ревухин и др., 2024, 2025; Amundsen et al., 2023). При этом исследования, направленные на выявление зависимости содержания Hg в печени, жабрах и гонадах рыб от длины тела, единичны (Чемагин и др., 2019).

Водохранилища Средней Волги характеризуются сложной гидрологической структурой и длительной аккумуляцией донных отложений, что способствует вовлечению ртути в биогеохимические циклы и её последующему накоплению в ихтиофауне. Горьковское и Чебоксарское водохранилища подвержены многоплановому антропогенному воздействию, при этом содержание ртути в мышечной ткани и органах промысловых видов рыб водохранилищ до настоящего времени оставалось практически неизученным.

Цель настоящего исследования – оценка зависимости содержания ртути (Hg) в мышечной ткани и органах некоторых промысловых видов рыб от длины тела в водохранилищах Средней Волги (Горьковском и Чебоксарском).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Отбор рыбы проводился с использованием ставных стационарных сетей в озёрных участках Горьковского и Чебоксарского водохранилищ в весенне-летний-осенний период 2025 г.

Общий объем материала – 120 экз. четырёх видов рыб: густера (*Blicca bjoerkna* L., 1758), лещ (*Abramis brama* L., 1758), плотва обыкновенная (*Rutilus rutilus* L., 1758) и окунь речной (*Perca fluviatilis* L., 1758). Для каждой видовой группы анализировали по 15 половозрелых особей одной размерной группы, с целью обеспечения статистической сопоставимости.

В лабораторных условиях проводили биометрический анализ (Правдин, 1966; Брюзгин, 1969; Комов, 2004; Котляр, 2004). Для анализа содержания ртути у каждой особи были отпрепарированы печень, жабры, гонады и мышечная ткань (между спинным плавником и боковой линией). Образцы помещали в герметичную лабораторную упаковку, маркировали и подвергали быстрой заморозке при -20 °C. Замороженные образцы транспортировались в лабораторию для последующего количественного определения металла.

Массовую долю общей ртути в мышечной ткани рыб определяли методом беспламенной атомно-абсорбционной спектроскопии на анализаторе РА-915+ с приставкой ПИРО-915+ (Люмэкс, Россия) в 2–3 повторностях. Контроль точности проводили с использованием стандартных образцов (DOLT-2, DORM-2); предел обнаружения составлял 0.0005 – 2.0000 мг/кг, расхождение параллельных определений не превышало 12%.

Результаты представлены в виде средних значений и их стандартных ошибок ($M \pm m$). Для сравнения средних значений концентрации ртути в двух водохранилищах для разных видов рыб использовали двухфакторный дисперсионный анализ с перестановками (пакет ImPerm) (Wheeler, Torchiano, 2025).

Для определения силы и направления связи концентрации ртути и размеров рыб проводили корреляционный анализ с использованием параметрического коэффициента корреляции Пирсона (r). Нормальность распределения данных проверяли с помощью критерия Шапиро – Уилка. На первом этапе корреляционного анализа оценивали общую сопряжённость накопления Hg между разными органами (мышечная ткань, печень, жабры, гонады) для всей совокупности проб. На втором этапе анализ проводили отдельно для каждого исследуемого вида рыбы в разрезе двух водохранилищ. Статистическую значимость коэффициентов корреляции оценивали с помощью t -критерия при уровне значимости $p = 0.05$. Тесноту связи интерпретировали на основе шкалы Чеддока (Chaddock, 1925).

Для оценки влияния длины тела рыб с учетом их видовой принадлежности на концентрацию ртути в тканях применяли ковариационный анализ (ANCOVA). Коэффициент наклона линий регрессии (β) интерпретировали как показатель интенсивности накопления Hg, т.е. изменение концентрации ртути при увеличении длины тела на 1 см. Визуализировали полученные результаты в виде совмещенных графиков регрессии для разных видов рыб. Во всех тестах критический уровень значимости принимали равным $p = 0.05$.

Статистическую обработку данных проводили с использованием программ в среде статистического анализа R версии 4.2.1 (R Core Team, 2022).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе анализа содержания ртути (Hg) в мышечной ткани и органах исследованных видов рыб установлено, что различные виды проявляют значительную видовую специфичность в аккумуляровании Hg. Эти закономерности наблюдаются как в Горьковском, так и в Чебоксарском водохранилищах. Средние значения концентрации аккумулярованной ртути (табл. 1, рис. 1) статистически значимо различались как между двумя водохранилищами ($p < 0.05$ для мышц, жабр и гонад), так и для разных видов рыб ($p < 0.05$ для всех исследованных типов тканей). При этом характер распределения Hg в тканях рыб определяется их видовой принадлежностью. В частности, у хищного окуня (*Perca fluviatilis*) концентрации ртути в мышцах и печени были выше, чем у бентофагов – густеры (*Blicca bjoerkna*), леща (*Abramis brama*) и плотвы (*Rutilus rutilus*) в обоих водохранилищах.

В Горьковском водохранилище у всех исследованных видов рыб содержание Hg в мышечной ткани статистически значимо выше, чем в печени, жабрах и гонадах (во всех случаях $p < 0.001$). Различия между остальными органами в большинстве случаев недостоверны ($p > 0.05$), однако отмечены отдельные различия: у густеры печень содержит больше ртути, чем гонады ($p = 0.044$), а превышение содержания ртути в печени над жабрами находится на грани значимости ($p = 0.0504$); у леща содержание ртути в печени выше, чем в жабрах ($p = 0.019$) и гонадах ($p < 0.001$). Наибольшие концентрации Hg фиксировались в мышцах у всех видов:

- густера (*Blicca bjoerkna*) – мышцы > печень > жабры ≥ гонады;
- лещ (*Abramis brama*) – мышцы > печень > жабры ≥ гонады;
- плотва (*Rutilus rutilus*) – мышцы > жабры > печень > гонады;
- окунь (*Perca fluviatilis*) – мышцы > печень > жабры ≥ гонады.

НАКОПЛЕНИЕ РТУТИ (Hg) В ОРГАНАХ И МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ

Табл. 1. Размерная характеристика и содержание ртути (сырой массы) в органах и тканях рыб Горьковского и Чебоксарского водохранилищ

Table 1. Size characteristics and mercury concentration (crude mass) in organs and tissues of fish in the Gor'ky and Cheboksary reservoirs

Вид / Species	Длина, см / Length, cm	Ртуть (Hg) в мышечной ткани, мг/кг / Mercury (Hg) in the muscle tissue, mg/kg	Ртуть (Hg) в печени, мг/кг / Mercury (Hg) in the liver, mg/kg	Ртуть (Hg) в жабрах, мг/кг / Mercury (Hg) in the gills, mg/kg	Ртуть (Hg) в гонадах, мг/кг / Mercury (Hg) in the gonads, mg/kg
Горьковское водохранилище / Gor'ky reservoir					
<i>Blicca bjoerkna</i>	<u>18.9±2.8</u> 14.7–23.9	<u>0.084±0.025</u> 0.042–0.135	<u>0.021±0.005</u> 0.013–0.031	<u>0.009±0.003</u> 0.005–0.014	<u>0.009±0.006</u> 0.002–0.019
<i>Abramis brama</i>	<u>23.9±5.2</u> 14.7–33.9	<u>0.073±0.044</u> 0.028–0.155	<u>0.043±0.009</u> 0.020–0.056	<u>0.019±0.004</u> 0.013–0.025	<u>0.010±0.003</u> 0.004–0.018
<i>Rutilus rutilus</i>	<u>19.1±2.9</u> 14.8–24.2	<u>0.093±0.040</u> 0.025–0.167	<u>0.017±0.010</u> 0.003–0.030	<u>0.026±0.012</u> 0.008–0.045	<u>0.008±0.002</u> 0.005–0.011
<i>Perca fluviatilis</i>	<u>17.9±2.0</u> 14.8–22.5	<u>0.121±0.074</u> 0.059–0.321	<u>0.036±0.011</u> 0.028–0.067	<u>0.028±0.006</u> 0.019–0.038	<u>0.028±0.010</u> 0.006–0.043
Чебоксарское водохранилище / Cheboksary reservoir					
<i>Blicca bjoerkna</i>	<u>19.3±3.0</u> 15.5–24.5	<u>0.096±0.058</u> 0.024–0.21	<u>0.008±0.003</u> 0.002–0.013	<u>0.003±0.001</u> 0.002–0.007	<u>0.008±0.003</u> 0.005–0.016
<i>Abramis brama</i>	<u>25.4±6.5</u> 15.5–34.0	<u>0.070±0.046</u> 0.015–0.158	<u>0.034±0.016</u> 0.009–0.064	<u>0.017±0.009</u> 0.006–0.040	<u>0.011±0.002</u> 0.006–0.017
<i>Rutilus rutilus</i>	<u>20.0±3.1</u> 15.1–25.0	<u>0.128±0.062</u> 0.046–0.246	<u>0.022±0.010</u> 0.004–0.037	<u>0.014±0.005</u> 0.004–0.020	<u>0.010±0.003</u> 0.005–0.014
<i>Perca fluviatilis</i>	<u>19.3±2.3</u> 15.2–22.4	<u>0.157±0.057</u> 0.046–0.246	<u>0.051±0.011</u> 0.034–0.073	<u>0.020±0.008</u> 0.007–0.038	<u>0.015±0.005</u> 0.006–0.026

Примечание. В числителе средняя арифметическая и стандартное отклонение, в знаменателе – *min* – *max*.

Note. The arithmetic mean and standard deviation are in the numerator, *min*–*max* in the denominator.

В Чебоксарском водохранилище также установлено более высокое содержание ртути в мышцах по сравнению с другими органами (во всех случаях $p < 0.001$). Между печенью, жабрами и гонадами различия чаще всего отсутствуют ($p > 0.05$), однако у окуня печень содержит больше ртути, чем жабры ($p = 0.026$) и гонады ($p = 0.008$), а у леща содержание ртути в мышцах больше, чем в печени ($p = 0.001$), при тенденции к различию между печенью и гонадами ($p = 0.052$). Здесь отмечена аналогичная закономерность распределения ртути:

- густера (*Blicca bjoerkna*) – мышцы > гонады > печень > жабры;
- лещ (*Abramis brama*) – мышцы > печень > жабры > гонады;
- плотва (*Rutilus rutilus*) – мышцы > печень > гонады > жабры;
- окунь (*Perca fluviatilis*) – мышцы > печень > жабры > гонады.

Такой видоспецифический паттерн накопления Hg согласуется с ранее опубликованными данными по пресноводным рыбам, согласно которым высшие трофические уровни способствуют усиленному накоплению ртути за счёт процессов биомагнификации (усиления концентрации стойких токсических веществ в тканях организма на каждом последующем уровне трофической сети) (Горбунов и др.,

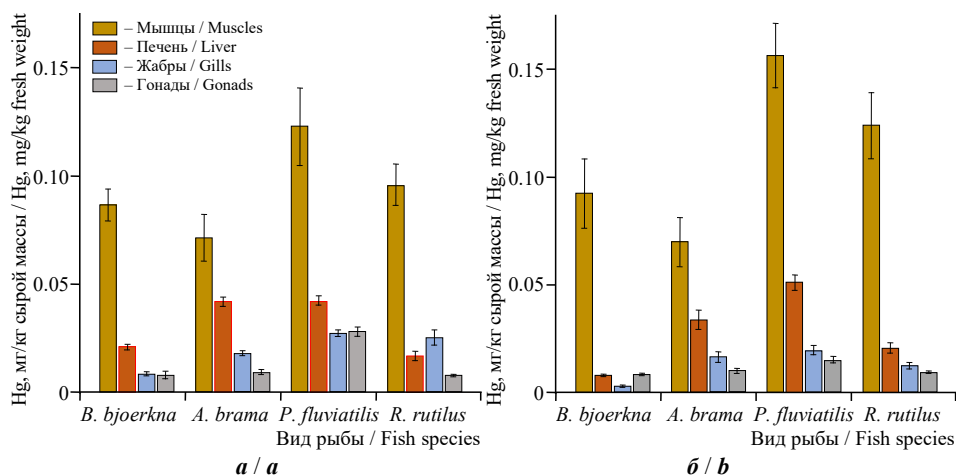


Рис. 1. Среднее содержание ртути в различных органах и тканях рыб Горьковского (а) и Чебоксарского (б) водохранилищ

Fig. 1. Average mercury concentration in various organs and tissues of fish in the Gor'ky (a) and Cheboksary (b) reservoirs

2018; Morel et al., 1998). Аналогичные зависимости были показаны для некоторых видов рыб водоемов Вологодской области, где концентрации ртути повышались у видов с более высоким трофическим статусом (*Esox lucius*, *Perca fluviatilis*) по сравнению с бентофагами (*Rutilus rutilus*, *Abramis ballerus*) и не превышали нормативных уровней, несмотря на вариабельность гидрохимических параметров водоемов (Баженова и др., 2024).

Кроме того, результаты по распределению Hg в тканях рыб Волги подтверждают, что мышечная ткань и печень аккумулируют наибольшие концентрации ртути, тогда как в жабрах и гонадах концентрации значительно ниже. Это отражает закономерности распределения ртути в биоте пресноводных систем, выявленные в масштабных исследованиях по Волге, где у окуня, щуки и леща наибольшие уровни Hg характерны для мышц и печени, а минимальные – для икры и других тканей с низкой способностью к долговременному накоплению (Горбунов и др., 2018).

Результаты корреляционного и ковариационного анализов выявили существенные различия в характере взаимосвязи между длиной тела и содержанием ртути в мышцах и органах у разных видов рыб в исследованных водохранилищах (табл. 2, рис. 2, 3).

В мышечной ткани концентрация Hg значимо коррелировала с размером для окуня и плотвы в обоих водохранилищах, а также для густеры в Горьковском водохранилище. В целом значения коэффициентов корреляции находились в пределах от 0.51 до 0.79, что свидетельствует о выраженной зависимости накопления ртути в мышцах от размеров тела. Корреляция для леща была незначимой в обоих водохранилищах.

НАКОПЛЕНИЕ РТУТИ (Hg) В ОРГАНАХ И МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ

Табл. 2. Коэффициенты корреляции Пирсона (r) и уровни статистической значимости (p -value) между длиной тела рыб и концентрацией ртути в мышечной ткани и органах

Table 2. Pearson's correlation coefficients (r) and the levels of statistical significance (p -value) between fish body length and mercury concentration in the muscle tissue and organs

Водохранилище / Reservoir	Вид рыбы / Fish species	Мышцы / Muscles		Печень / Liver		Жабры / Gills		Гонады / Gonads	
		r	p -value	r	p -value	r	p -value	r	p -value
Горьковское / Gor'ky	<i>B. bjoerkna</i>	0.58	0.02*	0.48	0.07	-0.68	0.005**	-0.69	0.004**
	<i>A. brama</i>	0.28	0.31	-0.41	0.13	-0.63	0.012*	-0.08	0.77
	<i>P. fluviatilis</i>	0.51	0.05*	0.31	0.26	0.61	0.015*	0.08	0.77
	<i>R. rutilus</i>	0.79	<0.001***	-0.14	0.62	0.84	<0.001***	-0.76	0.001**
Чебоксарское / Cheboksary	<i>B. bjoerkna</i>	0.09	0.74	0.63	0.01*	0.49	0.061	0.42	0.11
	<i>A. brama</i>	0.11	0.70	-0.12	0.67	-0.58	0.023*	0.41	0.12
	<i>P. fluviatilis</i>	0.63	0.012*	0.60	0.019*	0.89	<0.001***	0.97	<0.001***
	<i>R. rutilus</i>	0.61	0.015*	0.99	<0.001***	0.94	<0.001***	-0.81	<0.001***

Примечание. Уровни статистической значимости: * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$, *** – $p < 0.001$.

Note. Statistical significance levels: * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$, *** – $p < 0.001$.

Для печени статистически значимых корреляций между длиной тела рыб Горьковского водохранилища и концентрацией ртути выявлено не было ни у одного из исследованных видов. В Чебоксарском водохранилище характер взаимосвязей существенно отличается – значимыми были значения коэффициентов корреляции у плотвы, густеры и окуня. При этом у плотвы зафиксировано наибольшее значение ($r = 0.99$; $p < 0.001$), что свидетельствует о практически линейной зависимости накопления ртути от размеров особей.

При анализе содержания Hg в жабрах рыб выявлены разнонаправленные, но в большинстве случаев статистически значимые корреляции. Незначимой оказалась корреляция только у густеры в Чебоксарском водохранилище, хотя p -значение и

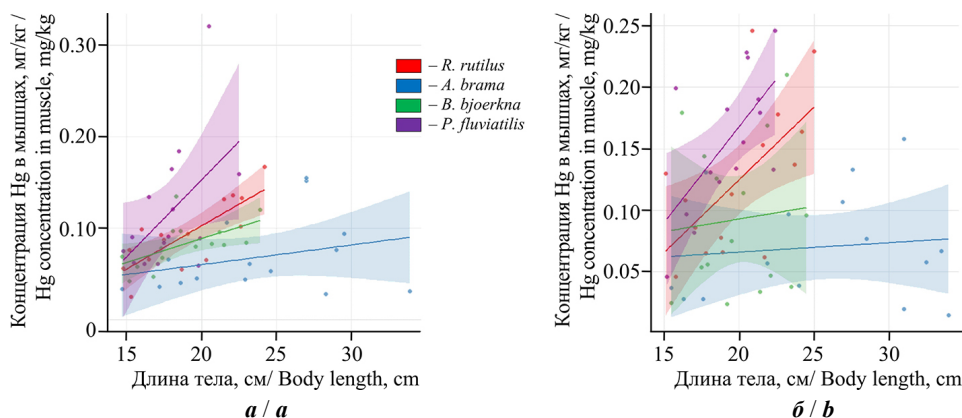


Рис. 2. Результаты ковариационного анализа зависимости содержания ртути в мышечной ткани разных видов рыб Горьковского и Чебоксарского водохранилищ от их длины тела

Fig. 2. Results of covariance analysis of the dependence of mercury concentration in the muscle tissue of different fish species of the Gor'ky and Cheboksary reservoirs on their body length

было близко к пороговому уровню. Сила связи варьировала от заметной до сильной (0.61 – 0.94). Положительные корреляции с размерами были выявлены у плотвы и окуня, а густера и леща характеризовались заметными отрицательными значениями коэффициента корреляции, что может указывать на особенности механизмов накопления ртути в жабрах у данных видов.

В гонадах рыб статистически значимые корреляции с длиной тела наблюдались значительно реже по сравнению с другими исследованными органами и мышечной тканью. Высокой отрицательной связью характеризовалось содержание

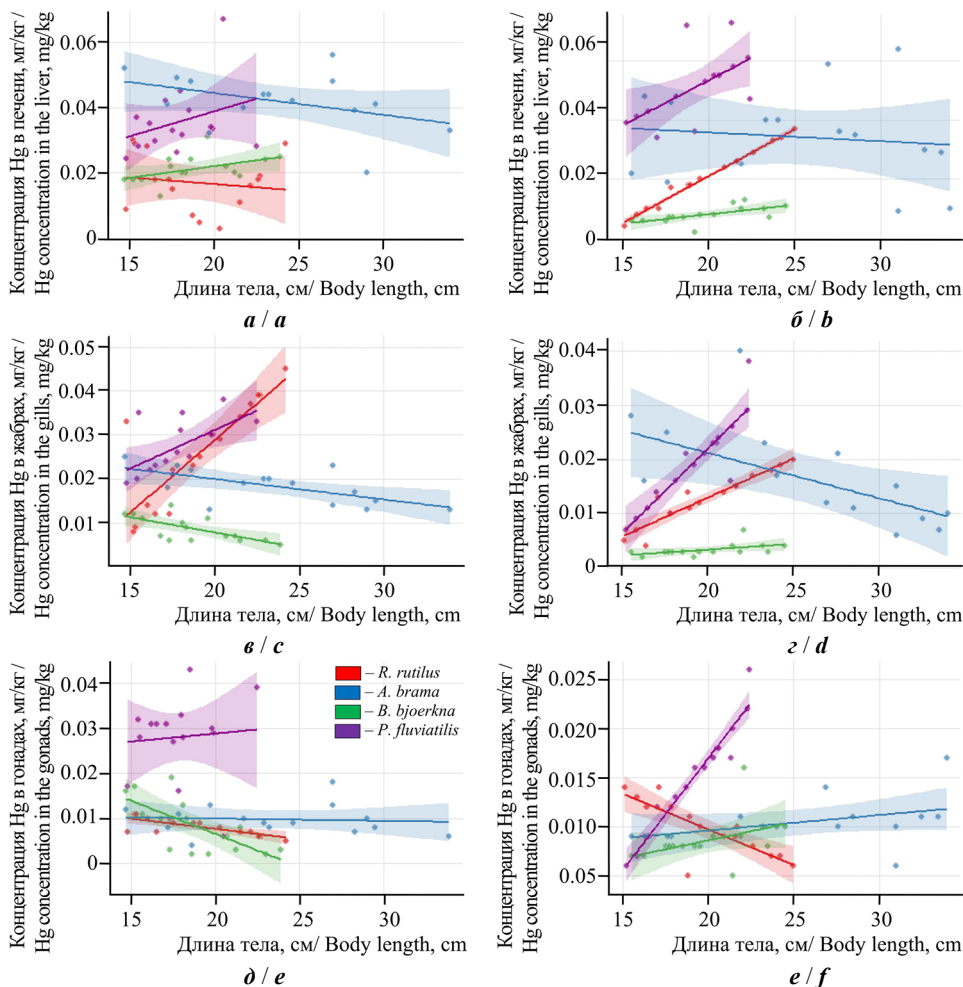


Рис. 3. Результаты ковариационной зависимости содержания ртути в печени, жабрах и гонадах рыб Горьковского и Чебоксарского водохранилищ от их длины тела

Fig. 3. Results of the covariance dependence of mercury concentration in the liver, gills, and gonads of fish in the Gor'ky and Cheboksary reservoirs on their body length

НАКОПЛЕНИЕ РТУТИ (Hg) В ОРГАНАХ И МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ

Hg в плотве из обоих водохранилищ. Также отрицательная корреляция наблюдалась для густеры в Горьковском водохранилище, но сильная положительная связь выявлена для окуня в Чебоксарском водохранилище ($r = 0.97$; $p < 0.001$).

В целом различия в величинах коэффициентов корреляции и уровнях статистической значимости между органами указывают на неодинаковую степень выраженности эффекта накопления ртути. Для печени во многих случаях характерны более низкие значения корреляции и статистически незначимые p -уровни. В жабрах, напротив, чаще наблюдаются высокие значения корреляции при статистически значимых показателях, указывающие на выраженную и стабильную связь с размером тела. Для гонад характерна наибольшая вариабельность как по знаку коэффициентов корреляции, так и по уровню статистической значимости.

Корреляционный анализ, проведенный для оценки связи между концентрациями ртути в мышечной ткани с концентрациями в других органах, показал наличие лишь слабых статистически значимых связей с печенью ($r = 0.28$, $p < 0.01$) и жабрами ($r = 0.20$, $p < 0.05$). С концентрацией в гонадах концентрация ртути в мышцах не коррелировала ($r = 0.11$, $p > 0.05$).

Несмотря на имеющиеся различия между Горьковским и Чебоксарским водохранилищами, в целом можно заключить, что характер накопления Hg в тканях исследуемых рыб во многом сходен (см. рис. 2, 3). Например, интенсивность накопления ртути в мышцах при росте размеров тела в обоих водохранилищах была максимальной у окуня (коэффициент наклона $\beta = 0.121$ и $\beta = 0.129$ для Горьковского и Чебоксарского водохранилищ соответственно, $p < 0.05$). То же, почти во всех случаях, справедливо и для других тканей, за исключением жабр рыб Горьковского водохранилища – здесь наибольший прирост концентрации ртути на 1 см длины тела выявлен у плотвы ($\beta = 0.148$, $p < 0.05$). При этом у леща, в отличие от других видов, только в одном случае прослеживается наличие связи между концентрацией ртути в тканях и длиной тела (для жабр в Чебоксарском водохранилище, $\beta = -0.053$, $p < 0.05$), а в большинстве случаев наклон линии регрессии значимо не отличался от нуля. Характер же накопления ртути в разных органах у других видов был более изменчивым.

По всей видимости, интенсивность накопления Hg как изменение концентрации на 1 см длины тела имеет биологический смысл в основном для мышечной ткани (см. рис. 2). Что касается органов (печень, жабры, гонады) применение такого подхода может оказаться менее корректным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установленные в Горьковском и Чебоксарском водохранилищах закономерности накопления ртути в разных органах и тканях рыб свидетельствуют о видоспецифической и тканеспецифической аккумуляции ртути и определяются как биологическими особенностями видов, так и условиями конкретного водоёма так же, как и в большинстве предыдущих исследований.

Наибольшие концентрации ртути выявлены в мышцах и печени, тогда как жабры и гонады содержат минимальные уровни Hg.

Хищный окунь демонстрирует более высокие уровни Hg в мышцах и печени по сравнению с бентофагами, что определяется его трофическим положением.

Выявлена значимая зависимость концентрации ртути в мышцах от длины тела у большинства видов рыб, тогда как для печени, жабр и гонад эта зависимость была менее выражена и вариабельна.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета вида рыб, типа анализируемой ткани и водоема при оценке уровней ртутного загрязнения, при этом наиболее информативным органом для оценки загрязнения водоемов ртутью является мышечная ткань, что важно для экологического мониторинга и прогнозирования потенциальных экологических и санитарных рисков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баженова Д. Э., Капустина В. Ю., Иванова Е. С. Содержание ртути в органах рыб разных водоемов Устюженского района Вологодской области // Самарский научный вестник. 2024. Т. 13, № 4. С. 8 – 13. <https://doi.org/10.55355/snv2024134101>; EDN: GVOSND

Брюзгин В. Л. Методы изучения роста рыб по чешуе, костям и отолитам. Киев: Наукова думка, 1969. 187 с.

Горбачев А. Л. Ртуть как приоритетный загрязнитель окружающей среды: уровень ртути и других токсичных элементов в организме аборигенных жителей северо-востока России // Микроэлементы в медицине. 2016. Т. 17, № 2. С. 3 – 9. <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2016-17-2-3-9>

Горбунов А. В., Ляпунов С. М., Окина О. И., Шешуков В. С. Биоаккумуляция ртути в тканях пресноводных рыб // Экология человека. 2018. Т. 25, № 11. С. 26 – 31. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2018-11-26-31>

Гремячих В. А., Комов В. Т., Иванчев В. П., Иванчева Е. Ю., Камшилова Т. Б. Содержание ртути в мышцах рыб из водоемов Окского заповедника и окрестных территорий // Труды Окского государственного природного биосферного заповедника. 2012. Вып. 27. С. 377 – 391. EDN: VSRIRX

Гремячих В. А., Ложкина Р. А., Комов В. Т. Пространственно-временная вариабельность содержания ртути в речном окуне *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 (Perciformes: Percidae) Рыбинского водохранилища на рубеже XX – XXI веков // Трансформация экосистем. 2019. Т. 2, № 2(4). С. 85 – 95. <https://doi.org/10.23859/estr-180816>; EDN: WMYVXA

Гремячих В. А., Комов В. Т., Базаров М. И., Иванова Е. С., Баженова Д. Е. Пространственная вариабельность интенсивности накопления ртути в мышцах разноразмерного окуня Рыбинского водохранилища // Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. 2024. № 108. С. 7 – 19. <https://doi.org/10.47021/0320-3557-2025-7-19>; EDN: FEUUFL

Колесников В. А., Бойченко Н. Б. Динамика накопления соединений тяжёлых металлов в органах и тканях разных видов рыб, обитающих в пределах одной водной экосистемы // Вестник КрасГАУ. 2012. № 8(71). С. 93 – 104. EDN: PIHRAR

Комов В. Т., Степанова И. К., Гремячих В. А. Содержание ртути в мышцах рыб из водоемов Северо-Запада России: причины интенсивного накопления и оценка негативного эффекта на состояние здоровья людей // Актуальные проблемы водной токсикологии / под ред. Б. А. Флерова. Борок: ИБВВ РАН, 2004. С. 99 – 123. EDN: SDNPTB

Котляр О. А. Методы рыбохозяйственных исследований (ихтиология). Рыбное: Дмитровский филиал АГТУ, 2004. 180 с.

Моисеенко Т. И., Гашкина Н. А. Биоаккумуляция ртути в рыбах как индикатор уровня загрязнения вод // Геохимия. 2016. № 6. С. 495 – 504. <https://doi.org/10.7868/S0016752516060042>; EDN: VYLXJB

НАКОПЛЕНИЕ РТУТИ (Hg) В ОРГАНАХ И МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ

Мур Дж. В., Рамамурти С. Тяжёлые металлы в природных водах. Контроль и оценка влияния. М.: Мир, 1987. 288 с.

Немова Н. Н., Лысенко Л. А., Мещерякова О. В., Комов В. Т. Ртуть в рыбах: биохимическая индикация // Биосфера. 2014. Т. 6, № 2. С. 176 – 186. EDN: SHJZCX

Немова Н. Н. Биохимические эффекты накопления ртути у рыб. М.: Наука, 2005. 164 с.

Паюта А. А., Флерова Е. А., Гульдина Д. А., Ключников А. С., Комов В. Т., Лобус Н. В. Связь размерно-массовых характеристик, показателей обмена веществ и концентрации ртути в мышечной ткани пресноводных рыб тропического Вьетнама // Биология внутренних вод. 2024. Т. 17, № 2. С. 276 – 285. <https://doi.org/10.31857/S0320965224020065>

Попов П. А., Андросова Н. В., Попов В. А. Характер накопления ртути в рыбах реки Оби // Российский журнал прикладной экологии. 2019. № 4(20). С. 51–56. EDN: NXLZNB

Правдин И. Ф. Руководство по изучению рыб (преимущественно пресноводных). 4-е изд., перераб. и доп. М.: Пищевая промышленность, 1966. 376 с.

Ревухин А. А., Воронин Р. Е., Постнов Д. И., Гремячих В. А., Шурганова Г. В. Содержание ртути (Hg) в мышцах рыб Горьковского водохранилища в зависимости от их массы тела (по результатам 2023 года) // Проблемы экологии Волжского бассейна: Труды 9-й Всероссийской научной конференции. Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. С. 20. EDN: LUFXLU

Ревухин А. А., Постнов Д. И., Гремячих В. А., Базаров М. И., Шурганова Г. В., Комов В. Т. Зависимость содержания ртути в мышечной ткани рыб Горьковского водохранилища от возраста и длины тела // Поволжский экологический журнал. 2025. № 2. С. 232 – 239. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-2-232-239>

Степанова И. К., Комов В. Т. Накопление ртути в рыбе из водоемов Вологодской области // Экология. 1997. № 4. С. 196 – 202. EDN: RZNBGR

Тропин Н. Ю., Борисов М. Я., Угрюмова Е. В., Комарова А. С., Иванова Е. С. Содержание ртути в мышечной ткани речного окуня (*Perca fluviatilis* L.) крупных водоемов Вологодской области // Токсикологический вестник. 2019. № 2. С. 53 – 58. <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2019-2-53-58>

Чемагин А. А., Волосников Г. И., Кыров Д. Н., Либерман Е. Л. Тяжёлые металлы Hg, Cd, Pb в организме стерляди (*Acipenser ruthenus* L.), Нижний Иртыш // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 2. С. 225 – 233. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-2-225-233>; EDN: ZYBNNZ

Шувырденков И. А., Гремячих В. А., Зарипов В. Н. Предварительные данные по содержанию ртути в органах и тканях некоторых видов рыб и млекопитающих Ивановской области // Ртуть и другие тяжелые металлы в экосистемах. Современные методы исследования содержания тяжелых металлов в окружающей среде: тезисы Всероссийской научной конференции и школы-семинара для молодых ученых, аспирантов и студентов. Череповец: Череповецкий государственный университет, 2018. С. 72 – 73. EDN: XRFQFF

Ali H., Khan E. Trophic transfer, bioaccumulation, and biomagnification of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in food chains/webs – Concepts and implications for wild-life and human health // Human and Ecological Risk Assessment. 2019. Vol. 25, № 6. P. 1353 – 1376. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1469398>

Amundsen P. A., Henriksson M., Poste A., Prati S., Power M. Ecological drivers of mercury bioaccumulation in fish of a subarctic watercourse // Environmental Toxicology and Chemistry. 2023. Vol. 42, iss. 4. P. 873–887. <https://doi.org/10.1002/etc.5580>; EDN: IBPHLK

Bloom N. S. On the chemical form of mercury in edible fish and marine invertebrate tissue // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 1992. Vol. 49, № 5. P. 1010 – 1017.

Cai Y., Jaffe R., Jones R. Ethylmercury in the soils and sediments of the Florida Everglades // Environmental Science & Technology. 1997. Vol. 31, № 1. P. 302 – 305. <https://doi.org/10.1021/es960587a>

Chaddock R. E. Principles and Methods of Statistics. Cambridge: Houghton Mifflin, 1925. 471 p.

Fioravanti R., Muzzioli L., Maurel E., Palma G., Calabrese G., Angioni A., La Rocca C., Mantovani A., Pezzana A., Donini L. M. Bioaccumulation and biomagnification of mercury along the seafood chain in Europe: A systematic review // *Foods*. 2025. Vol. 14, № 21. Art. 3752. <https://doi.org/10.3390/foods14213752>

Fitzgerald W. F., Lamborg C. H., Heinrich D. H., Karl K. T. Geochemistry of mercury in the environment // *Treatise on Geochemistry*. Oxford: Pergamon, 2007. P. 1 – 47.

Friedmann A. S., Kimble Costain E., Deborah L., MacLatchy S. W., Washuta E. J. Effect of mercury on general and reproductive health of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) from three lakes in New Jersey // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2002. Vol. 52. P. 117 – 122.

Gochfeld M. Case of mercury exposure, bioavailability and absorption // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2003. Vol. 56. P. 174 – 179.

Mason R., Pirrone N., Cinnirella S., Feng X., Finkelman R. B., Friedli H. R., Leaner J., Mukherjee A. B., Stracher G., Streets D. G., Telmer K. Global mercury emissions to the atmosphere from natural and anthropogenic sources // *Mercury Fate and Transport in the Global Atmosphere*. New York: Springer, 2009. P. 1 – 47.

Morcillo P., Esteban M. A., Cuesta A. Mercury and its toxic effects on fish // *AIMS Environmental Science*. 2017. Vol. 4, iss. 3. P. 386 – 402. <https://doi.org/10.3934/environsci.2017.3.386>

Morel F. M. M., Kraepiel A. M. L., Amyot M. The chemical cycle and bioaccumulation of mercury // *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1998. Vol. 29. P. 543 – 566. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.543>

Nriagu J. O. The Biogeochemistry of Mercury in the Environment. New York: Elsevier/North Holland Biomedical Press, 1979. 696 p.

Siciliano S. D., Sangster A., Daughney C. J., Loseto L., Germida J. J., Rencz A. N., O'Driscoll N. J., Lean D. R. S. Are methylmercury concentrations in the wetlands of Kejimikujik National Park, Nova Scotia, Canada, dependent on geology? // *Journal of Environmental Quality*. 2003. Vol. 32. P. 2085 – 2094.

Svobodova Z., Dušek L., Hejtmánek M., Vykusová B., Šmíd R. Bioaccumulation of mercury in various fish species from Orlik and Kamyk water reservoirs in the Czech Republic // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 1999. Vol. 43. P. 231 – 240.

Swain E. B., Engstrom D. R., Brigham M. E., Henning T. A., Brezonik P. L. Increasing rates of atmospheric mercury deposition in midcontinental North America // *Science*. 1992. Vol. 257. P. 784 – 787.

Visnjevec A., Kocman D., Horvat M. Human mercury exposure and effects in Europe // *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2014. Vol. 33, iss. 6. P. 1259 – 1270.

Wheeler B., Torchio M. lmerPerm: Permutation Tests for Linear Models. Version 2.1.6 // The Comprehensive R Archive Network. 2025. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.lmerPerm>

Wiener J. G., Krabbenhoft D. P., Heinz G. H., Scheuhammer A. M. Ecotoxicology of mercury // *Handbook of Ecotoxicology*. Boca Raton: CRC Press, 2003. P. 409 – 463.

**Mercury (Hg) accumulation in the organs and muscle tissue
of commercial fish species in water reservoirs of the Middle Volga**

A. A. Revukhin ^{1, 2✉}, **G. V. Shurganova** ², **I. A. Kudrin** ²,
R. E. Voronin ², **V. A. Gremyachikh** ³, **V. T. Komov** ³

¹ Nizhni Novgorod Branch of the Federal State Budget Scientific Institution
“Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography”
31 Moskovskoe shosse, Nizhni Novgorod 603116, Russia

² National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod
23 Gagarin Avenue, Nizhni Novgorod 603950, Russia

³ Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences
Borok, Nekouzsky district, Yaroslavl oblast 152742, Russia

Received: December 23, 2025 / revised: February 9, 2026 / accepted: February 9, 2026 / published: July 30, 2026

Abstract: The paper provides a comparative analysis of mercury (Hg) accumulation in the muscle tissue and organs of commercial fish in the Gor'ky and Cheboksary reservoirs. The research material consisted of 120 specimens of four fish species, namely: *Blicca bjoerkna*, *Abramis brama*, *Rutilus rutilus*, and *Perca fluviatilis*. The mercury concentrations in the muscles, liver, gills, and gonads were analyzed for each species group. The results showed a pronounced species specificity of accumulation, namely: the highest Hg concentrations were recorded in the muscle tissue and liver, the lowest it in the gills and gonads. Predatory perch is characterized by a higher mercury level, which reflects the influence of its trophic position. Correlation and covariance analysis revealed a significant dependence of mercury concentration in muscles on body length in most fish species, whereas this dependence was less pronounced and variable for the liver, gills, and gonads. The data obtained confirm the informative value of muscle tissue as an indicator of long-term mercury pollution and emphasize the need to take into account the species composition and size-age structure in the environmental monitoring of reservoirs.

Keywords: Hg, accumulation, freshwater fish, muscle tissue, liver, gills, gonads, trophic level, body length, Gor'ky reservoir, Cheboksary reservoir

Ethics approval and consent to participate: Animal protocols were approved by the Bioethics Commission of the Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod (protocol No. 68/1 dated March 1, 2023).

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

For citation: Revukhin A. A., Shurganova G. V., Kudrin I. A., Voronin R. E., Gremyachikh V. A., Komov V. T. Mercury (Hg) accumulation in the organs and muscle tissue of commercial fish species in water reservoirs of the Middle Volga. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2026, no. 2, pp. 219–234 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2026-2-219-234>

✉ *Corresponding author:* Laboratory of Aquatic Biological Resources Nizhni Novgorod Branch of the Federal State Budget Scientific Institution “Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography”, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Aleksandr A. Revukhin: <https://orcid.org/0009-0003-0370-2059>, revuchin@nizhegorod.vniro.ru; Galina V. Shurganova: <https://orcid.org/0000-0002-0253-6621>, galina.nngu@mail.ru; Ivan A. Kudrin: <https://orcid.org/0000-0003-2388-629X>, kudriniv@mail.ru; Roman E. Voronin: <https://orcid.org/0009-0000-3955-229X>, VRE.2003@yandex.ru; Vera A. Gremyachikh: <https://orcid.org/0009-0001-8896-9005>, grva@list.ru; Viktor T. Komov: <https://orcid.org/0000-0001-9124-7428>, vkomov@ibiw.ru

REFERENCES

- Bazhenova D. E., Kapustina V. Yu., Ivanova E. S. Mercury content in the organs fish from different reservoirs of the Ustyuzhensky district of the Vologda region. *Samara Journal of Science*, 2024, vol.13, iss. 4, pp. 8–13 (in Russian). <https://doi.org/10.55355/snv2024134101>; EDN: GVOSND
- Bryuzgin V. L. *Methods for Studying the Growth of Fish by Scales, Bones and Otoliths*. Kiev, Naukova dumka, 1969. 187 p. (in Russian).
- Gorbachev A. L. Mercury as a most important environmental pollutant: The body levels of mercury and other toxic chemical elements in indigenous residents of North-East Russia. *Trace Elements in Medicine*, 2016, vol. 17, no. 2, pp. 3–9 (in Russian). <https://doi.org/10.19112/2413-6174-2016-17-2-3-9>
- Gorbunov A. V., Lyapunov S. M., Okina O. I., Sheshukov V. S. Bioaccumulation of mercury in tissues of freshwater fish. *Human Ecology*, 2018, no. 11, pp. 26–31 (in Russian). <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2018-11-26-31>
- Gremjachih V. A., Komov V. T., Ivanchev V. P., Ivancheva E. Yu., Kamshilova T. B. The mercury content in muscles of fishes from basins of Oka Reserve and neighbourhood. *Proceedings of the Oka State Nature Biosphere Reserve*, 2012, vol. 27, pp. 377–391 (in Russian). EDN: VSRIRX
- Gremyachikh V. A., Lozhkina R. A., Komov V. T. Spatial-temporal variability of mercury content in the river perch *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 (Perciformes: Percidae) of the Rybinsk Reservoir at the turn of the XX–XXI centuries. *Ecosystem Transformation*, 2019, vol. 2, no. 2, pp. 34–44. <https://doi.org/10.23859/estr-180816>; EDN: WMYVXA
- Gremyachikh V. A., Komov V. T., Bazarow M. I., Ivanova E. S., Bazhenova D. E. Spatial variability of the intensity of mercury accumulation in the muscles of different-sized perch from the Rybinsk reservoir. *Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS*, 2024, no. 108, pp. 7–19 (in Russian). <https://doi.org/10.47021/0320-3557-2025-7-19>; EDN: FEUUFLL
- Kolesnikov V. A., Boichenko N. B. Dynamics of the heavy metal compound accumulation in the organs and tissues of various fish species that live in the limits of one water ecosystem. *Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University*, 2012, no. 8 (71), pp. 93 – 104 (in Russian). EDN: PIHRAR
- Komov V. T., Stepanova I. K., Gremyachikh V. A. Mercury content in muscles of fish from North-West Russia: Causes of intensive accumulation and assessment of negative effect on human health. In: Flerova B. A., ed. *Actual Problems of Aquatic Toxicology*. Borok, Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences Publ., 2004, pp. 99–123 (in Russian). EDN: SDNPTB
- Kotlyar O. A. *Metody rybokhozyaistvennykh issledovaniy (ikhtiologiya)* [Methods of Fisheries Research (Ichthyology)]. Rybnoye, Dmitrovsky Branch Astrakhan State Technical University Publ., 2004. 180 p. (in Russian).
- Moiseenko T. I., Gashkina N. A. Bioaccumulation of mercury in fish as indicator of water pollution. *Geochemistry International*, 2016, vol. 54, iss. 6, pp. 485–493. <https://doi.org/10.1134/S0016702916060045>; EDN: WVXITV
- Moore J. W., Ramamoorthy S. *Heavy Metals in Natural Waters. Applied Monitoring and Impact Assessment*. Moscow, Mir, 1987. 288 p. (in Russian).
- Nemova N. N., Lysenko L. A., Meshcheryakova O. V., Komov V. T. Mercury in fish: Biochemical indication. *Biosfera*, 2014, no. 2, pp. 176–186 (in Russian). EDN: SHJZCX
- Nemova N. N. *Biochemical Effects of Mercury Accumulation in Fish*. Moscow, Nauka, 2005. 164 p. (in Russian).
- Payuta A. A., Flerova E. A., Guldina D. A., Kliuchnikov A. S., Komov V. T., Lobus N. V. Relationship of size and mass characteristics, indicators of metabolism, and mercury concentration

in the muscle tissue of freshwater fish from tropical Vietnam. *Inland Water Biology*, 2024, vol. 17, iss. 2, pp. 296–306. <https://doi.org/10.1134/s1995082924020123>

Popov P. A., Androsova N. V., Popov V. A. Nature of mercury accumulation in fishes of the Ob river. *Russian Journal of Applied Ecology*, no. 4, pp. 51–56 (in Russian). EDN: NXLZNB

Pravdin I. F. *Rukovodstvo po izucheniyu ryb (preimushchestvenno presnovodnykh). Pod red. P. A. Dryagina, V. V. Pokrovskogo* [Dryagin P. A., Pokrovsky V. V., eds. Guidelines for the Study of Fish (Mainly Freshwater)]. Moscow, Pishchevaya promyshlennost', 1966. 376 p. (in Russian).

Revukhin A. A., Voronin R. E., Postnov D. I., Gremyachikh V. A., Shurganova G. V. The content of mercury (Hg) in the muscles of the fish of the Gorky reservoir, depending on their body weight (according to the results of 2023). *Environmental Issues in the Volga River Basin: Proceedings of the 9th All-Russian Scientific Conference*. Nizhni Novgorod, Volga State University of Water Transport Publ., 2024, pp. 20 (in Russian). EDN: LUFXLU

Revukhin A. A., Postnov D. I., Gremyachikh V. A., Bazarov M. I., Shurganova G. V., Komov V. T. Dependence of the mercury content in the muscle tissue of fish from the Gorky reservoir on age and body length. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2025, no. 2, pp. 232–239 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-2-232-239>

Stepanova I. K., Komov V. T. Mercury accumulation in fish from water bodies of the Vologdskaya oblast. *Russian Journal of Ecology*, 1997, vol. 28, no. 4, pp. 260–264. EDN: RZNBGR

Tropin N. Yu., Borisov M. Ya., Ugryumova E. V., Komarova A. S., Ivanova E. S. Mercury content in muscle tissue of perch (*Perca fluviatilis* (L.)) in large reservoirs of the Vologda region. *Toxicological Review*, 2019, no. 2, pp. 53–58 (in Russian). <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2019-2-53-58>

Chemagin A. A., Volosnikov G. I., Kyrov D. N., Liberman E. L. Heavy metals Hg, Cd, and Pb in the body of sterlet (*Acipenser ruthenus* L.), the Lower Irtysh River. *Vestnik of Murmansk State Technical University*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 225–233 (in Russian). <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-2-225-233>; EDN: ZYBNNZ

Shuvyrdenkov, I. A., Gremyachikh, V. A., Zaripov, V. N. Preliminary data on mercury content in the organs and tissues of certain fish and mammal species in the Ivanovo Region. In: *Mercury and Other Heavy Metals in Ecosystems. Modern Methods for Studying Heavy Metal Content in the Environment: Abstracts of the All-Russian Scientific Conference and Workshop for Young Scientists, Graduate Students, and Undergraduates*. Cherepovets, Cherepovets State University Publ., 2018, pp. 72–73 (in Russian). EDN: XRFQFF

Ali H., Khan E. Trophic transfer, bioaccumulation, and biomagnification of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in food chains/webs – Concepts and implications for wildlife and human health. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2019, vol. 25, no. 6, pp. 1353–1376. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1469398>

Amundsen P. A., Henriksson M., Poste A., Prati S., Power M. Ecological drivers of mercury bioaccumulation in fish of a subarctic watercourse. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2023, vol. 42, iss. 4, pp. 873–887. <https://doi.org/10.1002/etc.5580>. EDN IBPHLK

Bloom N. S. On the chemical form of mercury in edible fish and marine invertebrate tissue. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1992, vol. 49, no. 5, pp. 1010–1017.

Cai Y., Jaffe R., Jones R. Ethylmercury in the soils and sediments of the Florida Everglades. *Environmental Science & Technology*, 1997, vol. 31, no. 1, pp. 302–305. <https://doi.org/10.1021/es960587a>

Chaddock R. E. *Principles and Methods of Statistics*. Cambridge, Houghton Mifflin, 1925. 471 p.

Fioravanti R., Muzzioli L., Maurel E., Palma G., Calabrese G., Angioni A., La Rocca C., Mantovani A., Pezzana A., Donini L. M. Bioaccumulation and biomagnification of mercury along the seafood chain in Europe: A systematic review. *Foods*, 2025, vol. 14, no. 21, art. 3752. <https://doi.org/10.3390/foods14213752>

Fitzgerald W. F., Lamborg C. H., Heinrich D. H., Karl K. T. Geochemistry of mercury in the environment. In: *Treatise on Geochemistry*. Oxford, Pergamon, 2007, pp. 1–47.

Friedmann A. S., Kimble Costain E., Deborah L., MacLatchy S. W., Washuta E. J. Effect of mercury on general and reproductive health of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) from three lakes in New Jersey. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2002, vol. 52, pp. 117–122.

Gochfeld M. Case of mercury exposure, bioavailability and absorption. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2003, vol. 56, pp. 174–179.

Mason R., Pirrone N., Cinnirella S., Feng X., Finkelman R. B., Friedli H. R., Leaner J., Mukherjee A. B., Stracher G., Streets D. G., Telmer K. Global mercury emissions to the atmosphere from natural and anthropogenic sources. In: *Mercury Fate and Transport in the Global Atmosphere*. New York, Springer, 2009, pp. 1–47.

Morcillo P., Esteban M. A., Cuesta A. Mercury and its toxic effects on fish. *AIMS Environmental Science*, 2017, vol. 4, iss. 3, pp. 386–402. <https://doi.org/10.3934/environsci.2017.3.386>

Morel F. M. M., Kraepiel A. M. L., Amyot M. The chemical cycle and bioaccumulation of mercury. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1998, vol. 29, pp. 543–566. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.543>

Nriagu J. O. *The Biogeochemistry of Mercury in the Environment*. New York, Elsevier/North Holland Biomedical Press, 1979. 696 p.

Siciliano S. D., Sangster A., Daughney C. J., Loseto L., Germida J. J., Rencz A. N., O'Driscoll N. J., Lean D. R. S. Are methylmercury concentrations in the wetlands of Kejimikujik National Park, Nova Scotia, Canada, dependent on geology? *Journal of Environmental Quality*, 2003, vol. 32, pp. 2085–2094.

Svobodova Z., Dušek L., Hejtmánek M., Vykusová B., Šmíd R. Bioaccumulation of mercury in various fish species from Orlik and Kamyk water reservoirs in the Czech Republic. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1999, vol. 43, pp. 231–240.

Swain E. B., Engstrom D. R., Brigham M. E., Henning T. A., Brezonik P. L. Increasing rates of atmospheric mercury deposition in midcontinental North America. *Science*, 1992, vol. 257, pp. 784–787.

Visnjevec A., Kocman D., Horvat M. Human mercury exposure and effects in Europe. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2014, vol. 33, iss. 6, pp. 1259–1270.

Wheeler B., Torchiano M. ImPerm: Permutation Tests for Linear Models. Version 2.1.6. *The Comprehensive R Archive Network*, 2025. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.ImPerm>

Wiener J. G., Krabbenhoft D. P., Heinz G. H., Scheuhammer A. M. Ecotoxicology of mercury. In: *Handbook of Ecotoxicology*. Boca Raton, CRC Press, 2003, pp. 409–463.