



научный электронный журнал
ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ



<http://petrsu.ru>

Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 2 (60). Июнь, 2026

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
B. Krasnov
A. Gugolek
В. Н. Якимов
А. В. Сони́на

Службы поддержки

Н. А. Марфицына
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>



© ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»



597.556:504.4.054(282.247.41)

ИНТЕНСИВНОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ РТУТИ В МЫШЦАХ ПРОМЫСЛОВЫХ ВИДОВ РЫБ ГОРЬКОВСКОГО И ЧЕБОКСАРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩ

РЕВУХИН
Александр Андреевич

Нижегородский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО», 603116, г. Нижний Новгород, Московское шоссе, д. 31, sahek19981110@gmail.com

ЯКИМОВ
Василий Николаевич

доктор биологических наук, Нижегородский государственный университет, Россия, 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, damselfly@yandex.ru

КУДРИН
Иван Александрович

кандидат биологических наук, Нижегородский государственный университет, Россия, 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, kudriniv@mail.ru

ШУРГАНОВА
Галина Васильевна

доктор биологических наук, Нижегородский государственный университет, Россия, 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, galina.nngu@mail.ru

КОМОВ
Виктор Трофимович

доктор биологических наук, Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН, Россия, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, vkomov@ibiw.ru

Ключевые слова:

ртуть
Hg
содержание ртути
рыбы
интенсивность накопления
длина тела
Горьковское водохранилище
Чебоксарское водохранилище
экологический мониторинг

Аннотация: В работе проведена сравнительная оценка интенсивности накопления ртути (Hg) в мышечной ткани промысловых видов рыб (окунь, плотва, лещ, густера) Горьковского и Чебоксарского водохранилищ Средней Волги. Исследования выполнены на основе анализа 1239 экземпляров рыб, отобранных в 2023, 2024 и 2025 гг. Концентрации ртути определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии. Для оценки скорости накопления Hg использована многофакторная линейная модель зависимости «Hg – длина тела» с учетом видовой принадлежности и водоема. Установлено, что содержание ртути статистически значимо зависит от длины тела рыб, их видовой принадлежности и условий водоема ($p < 0.001$). Выявлены различия в скорости накопления ртути между видами, а также между водохранилищами. В Чебоксарском водохранилище концентрации Hg в выборке исследованных видов рыб в целом выше, чем в Горьковском. Показано, что различия в накоплении связаны не только с уровнем загрязнения, но и с особенностями гидрологического режима и трофических условий, определяющих биодоступность ртути и эффективность ее переноса. Проведен анализ факторов, определяющих различия в содержании и накоплении рыбами биодоступной метилртути между Горьковским и Чебоксарским водохранилищами. Наиболее высокая скорость накопления отмечена у окуня, наименьшая – у леща. Показано, что межвидовые различия в накоплении ртути носят водоем-зависимый характер, что под-

тверждается значимостью трехфакторного анализа. Полученные результаты демонстрируют, что исследуемые зависимости являются информативным показателем динамики биоаккумуляции ртути и могут быть использованы для экологического мониторинга водных экосистем.

© Петрозаводский государственный университет

Получена: 11 мая 2026 года

Подписана к печати: 26 июня 2026 года

Введение

Ртуть (Hg) относится к числу приоритетных глобальных загрязнителей. Поступая в атмосферу из природных и антропогенных источников, ртуть может переноситься на значительные расстояния и затем осаждаться в виде атмосферных осадков и поступать в водные объекты (Obrist et al., 2018). В водных экосистемах при восстановительных условиях ртуть может трансформироваться в метилртуть – форму ртути с высокой токсичностью и биодоступностью (Depew et al., 2013; Lavoie et al., 2013). Метилртуть биоаккумулируется и биомagniфицируется в пищевых цепях, накапливается в рыбе, оказывает значительное влияние на состояние гидробионтов и здоровье человека (Fioravanti et al., 2025; Visnjevec et al., 2014). У человека, потребляющего рыбу, содержащую метилртуть, отмечается увеличение риска развития неврологических и сердечно-сосудистых нарушений, внутриутробного развития (Mergler et al., 2007; Karagas et al., 2012).

Анализ литературных источников показывает, что содержание биодоступной метилртути в водоемах связано как с абиотическими, так и с биотическими факторами среды. Так, положительная связь содержания метилртути обнаруживается с площадью поверхности водоема (Kidd et al., 2012), отрицательная – с pH (Kamman et al., 2005), электропроводностью (удельной проводимостью) воды (Julian, Gu, 2014) и с соленостью воды. С увеличением солености воды снижается метилирование ртути из-за образования устойчивых комплексов с хлорид-ионами, при этом органические соединения ртути активно накапливаются в рыбах. Так, у морского керчака (*Myxocephalus scorpius*) содержание ртути в мышцах (0.03–0.2 мг/кг) ниже, чем у пресноводного окуня (*Perca fluviatilis*) (0.1–0.35 мг/кг), несмотря на сходные размеры и образ жизни (Комов и др., 2009).

Интенсивность накопления металлов в водных организмах зависит от гидрохимических условий и содержания органического вещества в среде, которое влияет как на микробное метилирование, так и на миграцию ртути в воде (Benoit et al., 2003). Растворенное органическое вещество в водном столбе

способствует связыванию Hg(II), что повышает удержание ртути в толще воды и изменяет ее подвижность (Allard, Arsenie, 1991; Xiao et al., 1995). Органическое вещество также участвует в фотохимическом восстановлении Hg(II) до Hg(0) с последующим переходом в атмосферу (O'Driscoll et al., 2003a, b; O'Driscoll et al., 2005a, b). Одновременно высокая концентрация органики снижает проникновение ультрафиолетового излучения и уменьшает глубину фотохимически активного слоя воды (Kirk, 1994; Lean, 1998), а также влияет на образование метилртути (Siciliano et al., 2005).

Повышение прозрачности воды и увеличение солнечной, особенно ультрафиолетовой, радиации усиливают фотохимические превращения ртути в водоемах. При этом возрастает восстановление двухвалентной ртути Hg(II) до летучей элементарной формы Hg(0), способной переходить в атмосферу (Amyot et al., 1994; O'Driscoll et al., 2007). Одновременно солнечное излучение способствует фотодеметилированию метилртути, снижая содержание ее наиболее токсичных органических форм (Sellers et al., 1996; Hammerschmidt, Fitzgerald, 2010).

Взвешенные частицы в водной среде способны сорбировать Hg(II) и частично Hg(0), снижая долю растворенной реакционно-активной ртути. В то же время повышенная мутность ограничивает проникновение света и может подавлять фотохимическое восстановление Hg(II) до летучей Hg(0). При оседании взвешенных частиц органического вещества ртуть переносится в донные отложения, где может вовлекаться в процессы метилирования и дальнейшее поступление в пищевые цепи либо захораниваться на длительное время (Liu et al., 2011).

Важным фактором, способным определять различия в биоаккумуляции Hg водоемов, является состояние планктонных сообществ, поскольку фито- и зоопланктон представляют собой начальные звенья трофической передачи ртути, от которых зависит ее поступление к высшим консументам. В ряде исследований показано, что характеристики планктонных сообществ существенно влияют на концентрации Hg в пищевых сетях. Так, Chen и Folt (2005) выявили отрицательную

связь между плотностью фитопланктона и массовыми концентрациями Hg как в самом фитопланктоне, так и в первичных консументах. Кроме того, при увеличении плотности зоопланктона и рыб наблюдалось снижение содержания ртути в их тканях. Показано, что плотность зоопланктона объясняет значительную долю вариации Hg у рыб, что указывает на ключевую роль нижних трофических уровней в регуляции биомагнификации. Эти закономерности связывают с совокупностью процессов, включая эффект «разбавления ростом» и снижение эффективности трофического переноса при высокой продуктивности нижних уровней пищевой сети (Chen, Folt, 2005; Pickhardt et al., 2002), что позволяет рассматривать плотность планктонных сообществ как важный фактор, определяющий степень биомагнификации ртути в водных экосистемах.

В высокопродуктивных водоемах может наблюдаться эффект «разбавления», при котором быстрое увеличение биомассы особей снижает концентрацию Hg на единицу массы (Karimi et al., 2007; Ward et al., 2010). Также отмечается комбинированный эффект, включающий рассеивание в первичных продуцентах (Miller et al., 2012), а также разбавление на организменном уровне. В результате в ряде случаев наблюдается снижение концентрации Hg у крупных особей, что противоречит классическим представлениям о кумулятивном накоплении, согласно которым ключевым механизмом распределения ртути в водных экосистемах является ее трофическая передача, при которой концентрация Hg в организмах увеличивается с повышением трофического уровня (Lavoie et al., 2013; Kidd et al., 2012). Содержание Hg в тканях рыб зависит от трофического уровня и особенностей питания, возраста, размеров (длины), а также продуктивности водоема (Depew et al., 2013; Eagles-Smith et al., 2014).

Для водохранилищ и рек бассейна Волги характерна выраженная пространственная неоднородность условий, влияющих на миграцию и накопление ртути. Гидрологический режим, степень эвтрофирования и структура трофических связей формируют зоны с различной интенсивностью метилирования и бионакопления Hg. Показано, что концентрация Hg в мышцах промысловых видов рыб (окунь, судак, щука, лещ, плотва и др.) изменяется вдоль течения Волги и ее водохранилищ, отражая действие локальных гидрологических и трофических факторов (Горбунов и др., 2018).

В то же время большинство исследований носят локальный характер, что затрудняет

обобщение результатов. Это подчеркивает необходимость комплексного подхода, учитывающего возрастную структуру популяций, трофические связи и пространственную вариабельность среды, для выявления закономерностей накопления Hg в экосистемах Волги (Ivanova et al., 2023).

Особый интерес представляет понятие скорости накопления ртути, которое в последние годы рассматривается как более адекватный индикатор экологических условий по сравнению с абсолютными концентрациями. В работе (Гремячих и др., 2024) показано, что интенсивность накопления ртути, оцениваемая по наклону регрессионной зависимости концентрации Hg от длины тела, существенно варьирует в пределах одного водоема. Это свидетельствует о высокой чувствительности данного показателя к локальным условиям среды. Вместе с тем следует отметить, что методологические подходы к оценке скорости накопления пока не стандартизированы, а результаты различных исследований трудно сопоставимы из-за различий в объемах выборки, размерных группах и статистических методах. В большинстве случаев анализ содержания Hg проводится на ограниченных размерных группах рыб, что затрудняет интерпретацию результатов и их сравнение между водоемами (Гремячих и др., 2022; Sackett et al., 2013; Ivanova et al., 2023).

Кроме работы Гремячих с соавт. (2024), в которой проведен анализ связи накопления ртути в мышцах с размерами тела окуня плесов Рыбинского водохранилища, публикации результатов исследований по интенсивности накопления Hg в мышцах рыб разных видов, обитающих в различных по комплексу физико-химических факторов среды водоемах России, нам неизвестны. При этом зарубежные исследования показывают, что интенсивность накопления Hg в рыбах, количественно оцениваемая по наклону линейной регрессии зависимости концентрации от размера тела, существенно варьирует в зависимости от условий среды и трофических факторов (Backstrom et al., 2020; Mills et al., 2022).

Целью настоящей работы является сравнительная оценка скорости накопления ртути в мышечной ткани промысловых видов рыб различных видов в зависимости от длины тела в водохранилищах Средней Волги (Горьковском и Чебоксарском).

Материалы

Наши исследования проводились на водохранилищах, различающихся по ряду аби-

отических и биотических факторов, времени создания, антропогенной нагрузке. Горьковское и Чебоксарское водохранилища – четвертая и пятая ступени Волжского каскада, входят в систему водоемов Средней Волги и существенно различаются по ряду характеристик. Чебоксарское водохранилище

характеризуется более высоким водообменом, большей минерализацией воды, более высокой трофностью, содержанием биогенных веществ, биомассой фитопланктона, зообентоса и рыб по сравнению с Горьковским (табл. 1).

Таблица 1. Гидрологическая, гидрохимическая и гидробиологическая характеристика Горьковского и Чебоксарского водохранилищ

Показатель	Горьковское водохранилище	Чебоксарское водохранилище	Источник
Коэффициент условного водообмена (Кв)	6.1	19.8	Тимофеева и др. (2021); Копылов и др. (2020)
Площадь, км ²	1591	1080	Тимофеева и др. (2021); Копылов и др. (2020)
Минерализация воды, мг/л	< 150	> 220	Шурганова (2007); Лазарева и др. (2018)
Взвешенные вещества, мг/л	7.5	9.1	Минеева (2003)
Прозрачность воды, см	130–170	40–100 (ниже впадения Оки), 130–140 (приплотинный плес)	Бикбулатов и др. (2006)
Биомасса фитопланктона, мг/л	1.04–3.10	3.26–5.44	Корнева и др. (2025)
Биомасса зоопланктона в речной части, г/м ³	≈0.5	≈0.5	Лазарева и др. (2018); Минин и др. (2024)
Биомасса зоопланктона в озерной части, г/м ³	1–4 г/м ³	1–5	Лазарева и др. (2018)
Биомасса кормового бентоса, г/м ²	10.6–29 г/м ²	16–180.7	Минин и др. (2024)
Трофический статус по хлорофиллу	Мезотрофно-умеренно эвтрофный	Эвтрофный	Минеева и др. (2022)
Биомасса рыб, кг/га	60.6–107	57.7–143.3	Минин и др. (2024)

С целью определения скорости накопления ртути проведен анализ мышечной ткани четырех видов рыб (1239 экз.): речного окуня (*Perca fluviatilis* L., 1758), обыкновенной плотвы (*Rutilus rutilus* L., 1758), леща (*Abramis brama* L., 1758) и густеры (*Blicca bjoerkna* L., 1758) (см. табл. 1).

Отлов рыб проводился на акваториях Горьковского и Чебоксарского водохранилищ, включающих речные, озерно-речные и озерные участки, расположенные в пределах Ярославской, Костромской, Ивановской и Нижегородской областей, а также Респу-

блики Марий Эл и Чувашской Республики (рис. 1).

Выборка формировалась с учетом достаточного объема наблюдений для обеспечения статистической достоверности оценок. Особи минимальных размеров (до 2+) в анализ не включались вследствие их недостаточной представленности у отдельных видов. Распределение особей по размерным классам было сбалансированным, что обеспечило репрезентативность размерно-возрастной структуры популяций исследуемых видов.

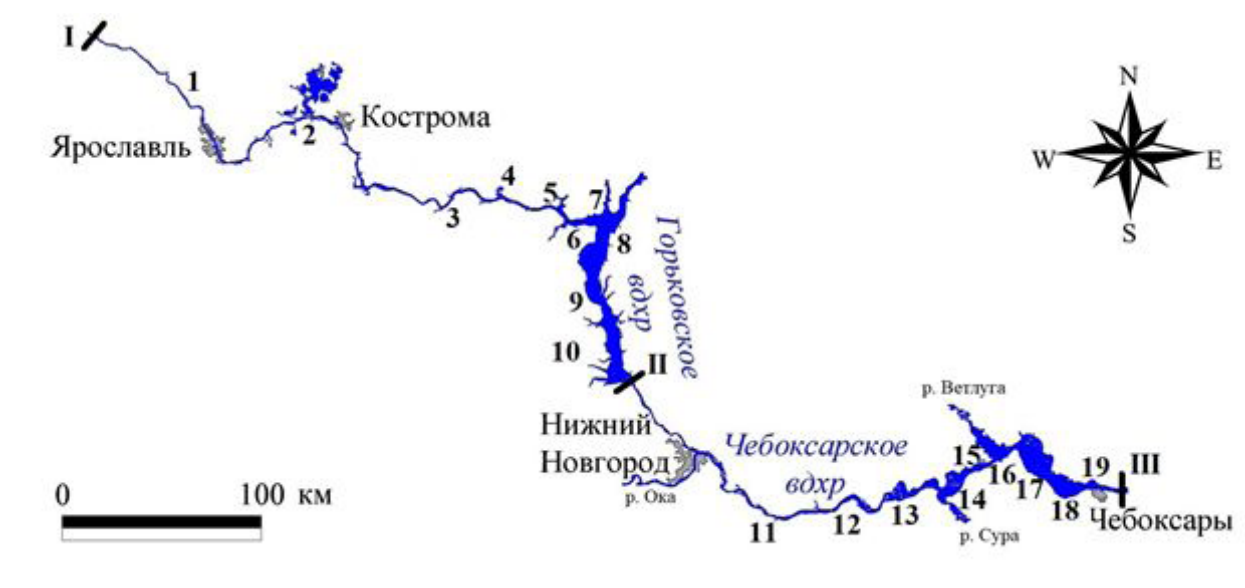


Рис. 1. Карта-схема расположения станций отбора проб. I – плотина Рыбинской ГЭС; II – плотина Горьковской ГЭС; III – плотина Чебоксарской ГЭС; Горьковское водохранилище: 1 – пос. Фоминское; 2 – пос. Паточного Завода; 3 – д. Стрелка; 4 – с. Никола-Мера; 5 – д. Сергеевская; 6 – д. Мауриха; 7 – Фетининские острова; 8 – д. Селянцево; 9 – г. Пучеж; 10 – с. Катунки; Чебоксарское водохранилище: 11 – с. Работки; 12 – с. Бармино; 13 – с. Фокино; 14 – р. п. Васильсурск; 15 – д. Яктансола; 16 – д. Мумариха; 17 – д. Шартнейка; 18 – д. Шомиково; 19 – п.г.т. Сосновка

Fig. 1. Map-layout of sampling stations. I – dam of the Rybinsk Hydroelectric Power Station; II – dam of the Gorky Hydroelectric Power Station; III – dam of the Cheboksary Hydroelectric Power Station; Gorky Reservoir: 1 – Fominskoye settlement; 2 – Patochny Zavod settlement; 3 – Strelka village; 4 – Nikola-Mera settlement; 5 – Sergeyevskaya village; 6 – Maurikha village; 7 – Fetinin Islands; 8 – Selyantsevo village; 9 – Puchezh town; 10 – Katunki village; Cheboksary Reservoir: 11 – Rabotki settlement; 12 – Barmino settlement; 13 – Fokino settlement; 14 – Vasilsursk urban-type settlement; 15 – Yaktansola village; 16 – Mumarikha village; 17 – Shartneyka village; 18 – Shomikovo village; 19 – Sosnovka urban-type settlement

Методы

Отлов рыб проводился в весенне-летне-осенний период 2023, 2024 и 2025 гг. с применением ставных стационарных сетей, неводов и траловых съемок в рамках научно-исследовательской программы по изучению водных биоресурсов, реализуемой Нижегородским филиалом ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО».

После вылова рыб помещали в специализированные контейнеры с контролируемым температурным режимом и транспортировали в лабораторию. Видовую принадлежность устанавливали в соответствии с «Аннотированным каталогом пресноводных рыб России» (1998) и «Атласом пресноводных рыб России» (2002). В лабораторных условиях выполняли комплексный биологический анализ особей. Длину тела и возраст особей определяли согласно общепринятым икhtiологическим методикам (Правдин, 1966; Брюзгин, 1969; Котляр, 2004). Образцы мышечной ткани отбирали из области между боковой линией и спинным плавником.

Исследования на животных проводили в соответствии с этическими стандартами, изложенными в Хельсинкской декларации

1964 г. и более поздних ее редакциях.

Концентрацию Hg в мышечной ткани рыб (мг/кг сырой массы) определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии с использованием ртутного анализатора РА-915+ и приставки ПИРО (Люмэкс) в трех повторностях. Для контроля точности анализа применяли сертифицированные биологические стандарты DORM-2 и DOLM-2 (Институт химии окружающей среды, Оттава, Канада). Прибор позволял определять Hg в диапазоне от 0.0005 до 2.0 мг/кг, а среднее расхождение между повторными измерениями не превышало 7.5 %.

Статистическую обработку данных проводили в среде R версии 4.5.2 (R Core Team, 2025). Результаты представлены в виде диапазона значений (min–max), средних значений и их стандартных ошибок ($M \pm m$). Для анализа скорости накопления ртути в мышечной ткани рыб строили многофакторную линейную модель зависимости концентрации ртути от длины рыбы, ее вида и принадлежности к одному из двух водохранилищ. Значимость различий между группами определяли по F-критерию Фишера при уровне значимости $p < 0.05$. Основным критерием

сравнения выборок являлась статистическая значимость различий средних значений исследуемого показателя. Концентрации Hg в анализе были логарифмированы для лучшего соответствия нормальному распределению. Парные сравнения скоростей накопления ртути проводили с использованием метода ожидаемых маргинальных средних (estimated marginal means, EMMs), реализованного в пакете *emmeans* (Lenth, 2026).

Результаты

По результатам анализа установлен возрастной и размерный состав исследованных рыб (окуня, плотвы, леща и густеры) в Горь-

ковском и Чебоксарском водохранилищах, а также определены диапазоны содержания Hg в их мышечной ткани.

Среднее содержание ртути в мышцах рыб различалось как между видами, так и между водохранилищами. Наименьшие значения отмечались у леща, наибольшие – у окуня. Средние концентрации металла у окуня были сопоставимы между водохранилищами, тогда как у других видов наблюдались более выраженные различия, при этом рыбы из Чебоксарского водохранилища, как правило, имели более высокие уровни ртути (табл. 2).

Таблица 2. Размерно-возрастные характеристики и концентрация ртути (Hg) в мышцах рыб Горьковского и Чебоксарского водохранилища

Вид	Водохранилище	Кол-во, экз.	Возраст	Длина, см	Ртуть (Hg), мг/кг
Окунь	Горьковское	75	2+–6+	16.0 ± 0.39	0.094 ± 0.007
				11.1–22.5	0.024–0.382
	Чебоксарское	54	2+–6+	18.0 ± 0.48	0.136 ± 0.008
				10.9–22.4	0.046–0.246
Плотва	Горьковское	139	2+–8+	14.3 ± 0.40	0.058 ± 0.003
				8.0–25.3	0.015–0.167
	Чебоксарское	206	2+–10+	17.4 ± 0.39	0.090 ± 0.004
				7.7–28.2	0.016–0.343
Лещ	Горьковское	182	2+–10+	27.2 ± 0.47	0.048 ± 0.002
				14.6–43.8	0.011–0.173
	Чебоксарское	165	2+–10+	25.9 ± 0.59	0.066 ± 0.003
				14.5–45.0	0.015–0.207
Густера	Горьковское	215	2+–10+	17.8 ± 0.28	0.088 ± 0.002
				8.0–27.5	0.023–0.254
	Чебоксарское	203	4+–12+	18.6 ± 0.29	0.122 ± 0.004
				13.1–30.0	0.024–0.352

Примечание. В числителе представлено среднее значение ± стандартная ошибка ($M \pm$), в знаменателе – диапазон значений (min–max).

Таблица 3. Результаты статистического анализа модели зависимости концентрации ртути (Hg) в мышечных тканях рыб от длины тела, вида рыбы и принадлежности к водохранилищу

Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	Значение критерия Фишера, F	p-значение
Длина тела	1	2.030	2.0301	64.1204	< 0.001***
Вид рыбы	3	33.315	11.1049	350.7469	< 0.001***
Водохранилище	1	4.497	4.4969	142.0333	< 0.001***
Длина:Вид	3	1.405	0.4682	14.7880	< 0.001***
Длина:Водохранилище	1	0.297	0.2973	9.3913	0.002**
Вид:Водохранилище	3	0.035	0.0115	0.3636	0.779
Длина:Вид:Водохранилище	3	0.713	0.2378	7.5100	< 0.001***
Остатки	1223	38.721	0.0317		

Примечание. Уровни статистической значимости: *** $p < 0.001$; ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$. Двоеточие указывает на эффект взаимодействия между факторами

Статистический анализ линейной модели зависимости концентрации ртути в мышечных тканях рыб от длины тела, вида рыбы и ее принадлежности к одному из двух водохранилищ показал, что почти все компоненты модели значимы (см. табл. 3, рис. 2). Наблюдается значимая связь концентрации ртути с длиной рыбы, наклон этой зависимости мы рассматриваем как скорость накопления металла при росте рыбы. Также концентрации значимо различались в тка-

нях разных видов рыб (концентрация в тканях леща была в среднем ниже, чем в тканях других видов), что может указывать на отличия в трофическом статусе рыб, но также может отражать особенности размерного распределения. Значимость эффекта водохранилища отражает общую тенденцию к более высокой концентрации Hg в рыбе из Чебоксарского водохранилища по сравнению с Горьковским.

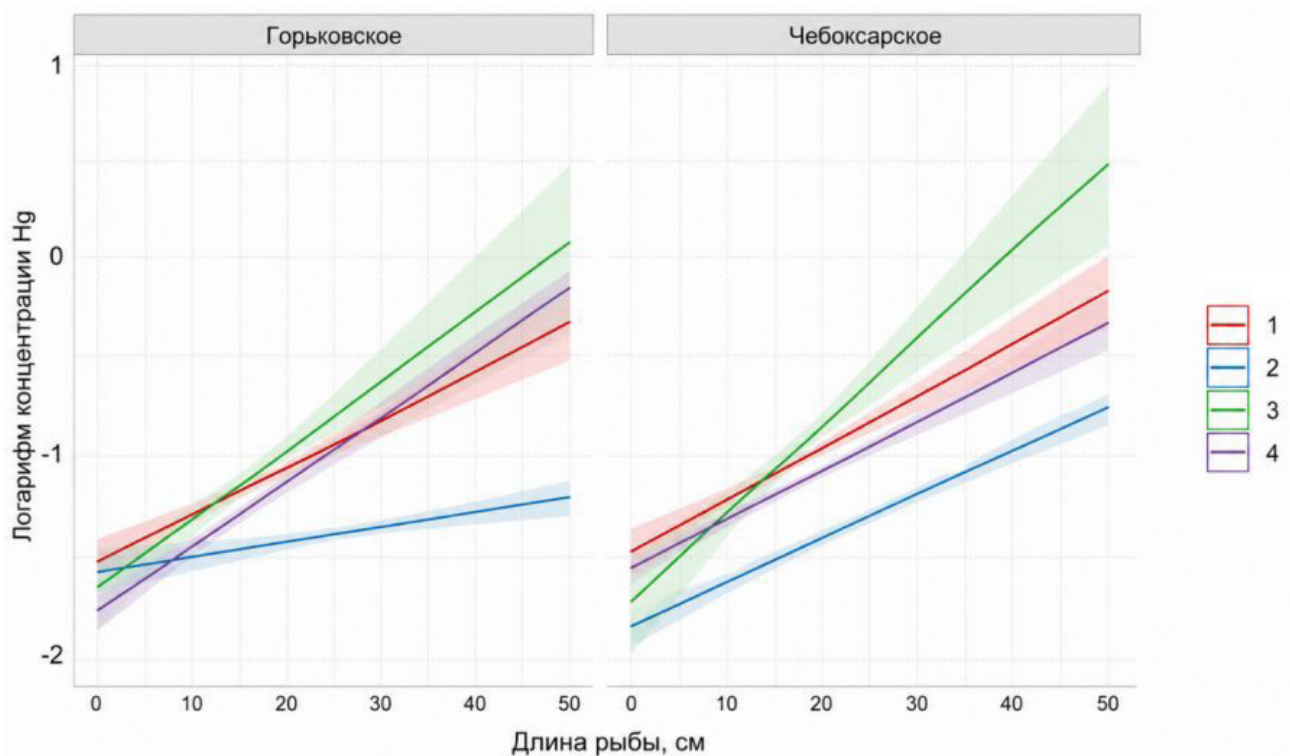


Рис. 2. Зависимость логарифма концентрации ртути (Hg) от длины рыбы, ее вида и принадлежности к двум водохранилищам. Представлены линейные зависимости и соответствующие доверительные интервалы на основе трехфакторной модели. 1 – густера, 2 – лещ, 3 – окунь, 4 – плотва

Fig 2. Dependence of the logarithm of mercury concentration (Hg) on the length of the fish, its type and belonging to two reservoirs. Linear relationships and corresponding confidence intervals based on a three-factor model are shown. 1 – *Blicca bjoerkna*, 2 – *Abramis brama*, 3 – *Perca fluviatilis*, 4 – *Rutilus rutilus*

Значимость эффекта взаимодействия трех факторов указывает на то, что скорость накопления Hg в мышцах рыб значимо отличается как между видами рыб в пределах водохранилища, так и между водохранилищами для одного вида рыбы. Коэффициенты наклона (скорости накопления Hg) для разных видов рыб в двух водохранилищах, а также результаты множественных сравнений внутри водохранилища представлены на рис. 3.

В Горьковском водохранилище скорость накопления ртути в мышечной ткани леща оказалась статистически значимо ниже по сравнению с другими видами рыб, которые не имели значимых отличий между собой. В то же время в Чебоксарском водохранилище скорости накопления ртути у леща, плотвы и густеры значимо не различались, тогда как у окуня отмечена более высокая скорость накопления по сравнению с лещом и плотвой.

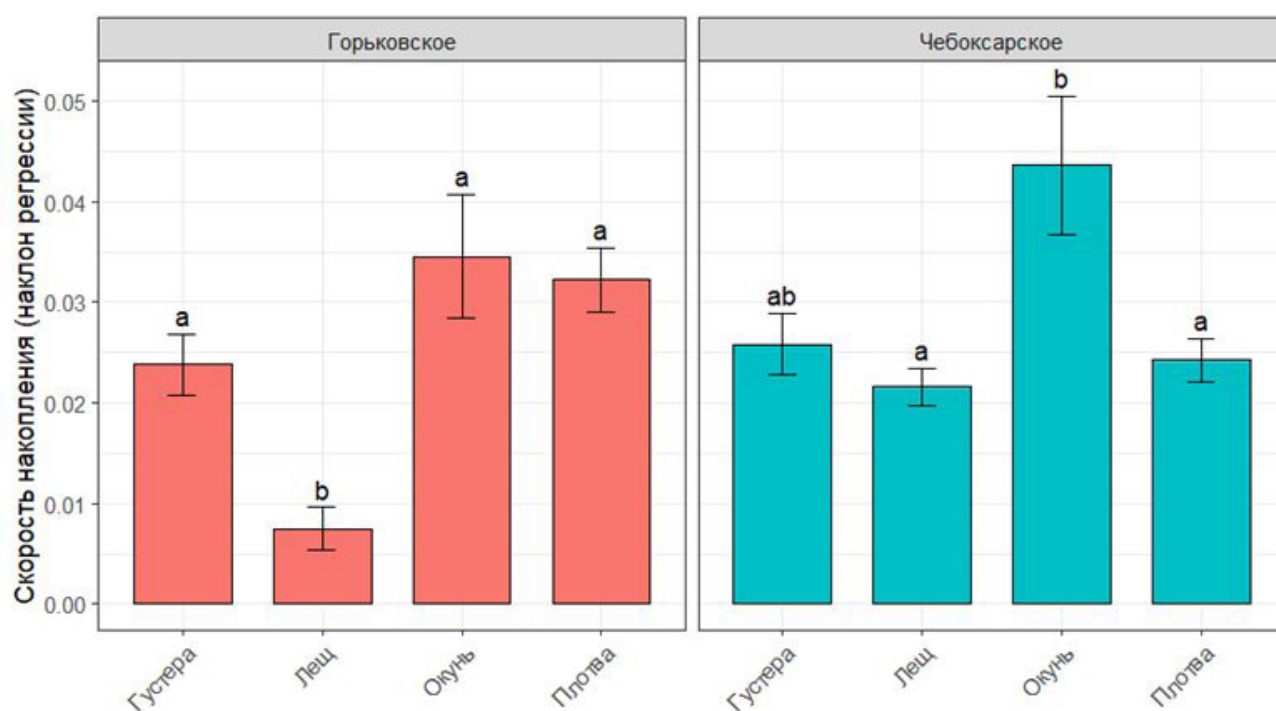


Рис. 3. Скорости накопления Hg (коэффициенты наклона линий регрессии, см. рис. 2) для четырех видов рыб в двух водохранилищах. Погрешности отражают доверительные интервалы оценок. Компактные буквенные обозначения отражают результаты множественных сравнений между видами рыб в пределах водохранилища (значимо отличаются виды, которые не имеют общих букв)
 Fig. 3. Accumulation rates of Hg (coefficients of slope regression lines, see Fig. 2) for four fish species in two reservoirs. The errors reflect the confidence intervals of the estimates. Compact letter designations reflect the results of multiple comparisons between fish species within the reservoir; species that do not have common letters differ significantly)

Проведены также множественные сравнения для каждого вида рыб между двумя водохранилищами. Результаты показали, что отличия в скорости накопления ртути в мышцах рыб между водохранилищами значимы для леща ($p < 0.001$) и плотвы ($p = 0.039$), но не для густеры ($p = 0.63$) и окуня ($p = 0.323$). При этом скорость накопления Hg в мышечной ткани леща выше в Чебоксарском водохранилище, тогда как для плотвы скорость накопления выше в Горьковском водохранилище.

Обсуждение

Результатом проведенного исследования является выявленная зависимость концентрации ртути от длины тела рыб, отражающая процесс ее накопления в ходе индивидуального роста. Положительная связь между размерно-возрастными характеристиками и концентрацией Hg широко описана в литературе (Backstrom et al., 2020; Gedig et al., 2023; Mills et al., 2018; Mills et al., 2022; Sullivan et al., 2023; Sackett et al., 2013;

Backstrom et al., 2020; Dang, Wang, 2012) и интерпретируется как результат биоаккумуляции и трофических сдвигов в процессе онтогенеза. В настоящем исследовании показано, что данная зависимость не только статистически значима, но и характеризуется различиями в наклоне регрессионных зависимостей, интерпретируемом как скорость накопления Hg.

Различия в скорости накопления между видами, выявленные через значимое взаимодействие «Длина:Вид», могут быть обусловлены видовыми различиями в темпах роста и индивидуальными особенностями питания. Важным результатом является различие скоростей накопления металла между водохранилищами («Длина:Водохранилище»), что указывает на влияние локальных экологических условий не только на уровень загрязнения, но и на динамику его накопления. Это подтверждает выводы о том, что концентрации ртути сами по себе не всегда отражают особенности функционирования экосистемы и что использование показате-

лей скорости накопления может быть более чувствительным инструментом оценки (Гремячих и др., 2024).

Наиболее важным является эффект взаимодействия всех трех факторов («Длина:Вид:Водохранилище»), демонстрирующий, что межвидовые различия в накоплении ртути зависят от конкретного водоема. Показано, что влияние указанных факторов носит комплексный и взаимосвязанный характер и может варьировать между водоемами (Eagles-Smith et al., 2018). Это свидетельствует о сложной, контекст-зависимой природе процессов биоаккумуляции ртути и подчеркивает значимость взаимодействий между ключевыми экологическими факторами в формировании концентраций Hg в рыбах.

Одним из основных факторов, определяющих различия в содержании и накоплении рыбами биодоступной метилртути между Горьковским и Чебоксарским водохранилищами, является, по всей видимости, особенность их гидрологического режима. Чебоксарское водохранилище характеризуется существенно более интенсивным водообменом по сравнению с Горьковским, что определяет комплекс физико-химических параметров водоема, а также состав и структуру его биоценозов. Более интенсивный водообмен Чебоксарского водохранилища отражает его повышенную гидродинамическую активность и, как следствие, более длительное пребывание взвешенного органического вещества (являющегося одним из депо ртути в водной экосистеме) в толще воды. Известно, что как неорганическая, так и метилированная ртуть способны связываться с взвешенными частицами и органическим веществом, а последующая седиментация способствует выведению металла из водного столба и уменьшению его биодоступности для гидробионтов (Liu et al., 2011).

Более низкое содержание ртути в мышцах рыб Горьковского водохранилища по сравнению с Чебоксарским, вероятно, связано с различиями в интенсивности седиментационных процессов и фотовосстановления ртути. В частности, концентрация взвешенного вещества в Горьковском водохранилище ниже, чем в Чебоксарском (Минеева, 2003; Бикбулатов и др., 2006), что в сочетании с меньшей интенсивностью водообмена определяет более короткое время его нахождения в толще воды. В Чебоксарском водохранилище метилированная ртуть, связываясь со взвешенными частицами и органическим веществом,

более длительно пребывает в толще воды по сравнению с Горьковским водохранилищем. При этом наиболее активная седиментация взвеси наблюдается в Горьковском водохранилище, что сопровождается снижением ее биодоступности для планктонных и нектонных организмов, обитателей толщи воды.

Косвенным подтверждением этого механизма являются данные по донным отложениям: в Горьковском водохранилище накопление общей ртути в поверхностных осадках происходит интенсивнее, чем в более гидродинамичном Чебоксарском водохранилище (Udodenko et al., 2018).

Различия в прозрачности воды между водохранилищами также могут играть существенную роль в трансформации ртути. В Горьковском водохранилище, где прозрачность выше как в речной, так и в приплотинной зонах по сравнению с Чебоксарским (Бикбулатов и др., 2006), создаются условия для более интенсивного проникновения ультрафиолетового излучения в водную толщу. Это способствует усилению фотохимических реакций, включая восстановление двухвалентной ртути Hg(II) до элементарной формы Hg(0). Поскольку Hg(0) является летучей, она может переходить в атмосферу, что ведет к снижению содержания ртути в водной среде (Amyot et al., 1994; O'Driscoll et al., 2007).

Учитывая, что вода Чебоксарского водохранилища в целом имеет более высокую минерализацию, чем вода Горьковского (Шурганова, 2007), следует отметить, что районы с повышенной минерализацией ниже впадения правобережных притоков рек Ока и Сура занимают ограниченные акватории и не могут, по всей видимости, являться определяющими в процессах биоаккумуляции ртути водохранилища в целом.

Поскольку интенсивность накопления ртути в водных организмах определяется, в частности, структурой пищевых сетей, трофическим положением организмов и продуктивностью экосистемы (Clayden et al., 2023), а состояние планктонных сообществ (фито- и зоопланктона) является фактором, способным определять межводоемные различия и степень биомагнификации ртути (Chen, Folt, 2005; Pickhardt et al., 2002), целесообразно сравнить исследуемые водохранилища по биомассе фито- и зоопланктона. Биомасса фитопланктона Горьковского водохранилища (1.04–3.10 мг/л) ниже, чем Чебоксарского (3.26–5.44 мг/л) (Корнева и др., 2025). Биомасса зоопланктона речных частей двух водохранилищ составляет около 0.5 мг/л, тогда

как в озерной части Чебоксарского водохранилища ($1\text{--}5\text{ г/м}^3$) в летний период она может превышать биомассу зоопланктона Горьковского водохранилища ($1\text{--}4\text{ г/м}^3$) (Лазарева и др., 2018). Незначительные различия в уровнях биомасс зоопланктона двух водохранилищ, по всей видимости, не являются определяющими в различиях накопления ртути рыбой этих водоемов.

По концентрации хлорофилла статус Горьковского водохранилища определен как мезотрофно-умеренно эвтрофный, Чебоксарского – как эвтрофный (Минеева и др., 2022).

В целом полученные результаты согласуются с данными о выраженной пространственной неоднородности содержания ртути в рыбах бассейна Волги (Горбунов и др., 2018) и с современными представлениями о биоаккумуляции ртути в водных экосистемах (Ревухин и др., 2025, 2024; Баженова и др., 2024; Паюта и др., 2024). Более высокая скорость накопления ртути в тканях окуня в Чебоксарском водохранилище может отражать сочетание более интенсивного поступления металла в связи с типом питания (хищничество), что соответствует данным о биомагнификации ртути в пищевых сетях (Ревухин и др., 2025; Гремячих и др., 2024; Тропин и др., 2019; Lavoie et al., 2013; Kidd et al., 2012). Напротив, относительно низкие скорости накопления ртути в тканях леща могут быть связаны с его бентосным типом питания и менее интенсивным распределением ртути в мышечной ткани из-за эффекта «разбавления ростом», ранее описанного для быстрорастущих рыб (Karimi et al., 2007; Ward et al., 2010).

Заключение

В работе впервые для водохранилищ Средней Волги проведена сравнительная оценка скорости накопления ртути в мышечной ткани рыб различных видов с учетом принадлежности к разным водоемам. Подобные исследования в отечественной и зарубежной литературе представлены ограниченно, что подчеркивает актуальность полученных результатов.

Результаты анализа содержания ртути в мышцах рыб показали устойчивые межвидовые различия и систематически более высокие концентрации Hg у рыб Чебоксарского водохранилища по сравнению с Горьковским, что указывает на значимые межводоемные различия в уровне биодоступной ртути.

Статистический анализ выявил высокую значимость влияния длины тела, видовой принадлежности и условий водоема на концентрацию ртути ($p < 0.001$), а также их сложные взаимодействия, включая трехфакторный эффект (Длина:Вид:Водохранилище). Это свидетельствует о нелинейном и контекст-зависимом характере процессов биоаккумуляции ртути, формирующихся под совместным влиянием биологических и абиотических факторов.

Сравнение водохранилищ показало, что их различия проявляются не только в уровнях накопления ртути, но и в характере ее накопления в онтогенезе рыб. В Чебоксарском водохранилище в целом отмечены более высокие концентрации ртути в мышцах рыб и иная структура межвидовых различий скорости накопления по сравнению с Горьковским водохранилищем, что отражает влияние различий в гидрологическом режиме, трофических условиях и параметрах среды.

Показано, что параметры зависимости «Hg – длина тела» позволяют выявлять различия в динамике накопления ртути между видами рыб и водоемами, дополняя информацию, получаемую при анализе средних концентраций.

Проведенный анализ факторов, определяющих различия в содержании и накоплении рыбами биодоступной метилртути между Горьковским и Чебоксарским водохранилищами, свидетельствует о том, что большинство из них определяют, что в Чебоксарском водохранилище комплекс этих факторов способствует в целом более высокому содержанию ртути в мышцах промысловых видов рыб.

Полученные результаты показали, что отличия в скорости накопления между водохранилищами значимы для леща ($p < 0.001$) и плотвы ($p = 0.039$), но не для густеры ($p = 0.63$) и окуня ($p = 0.323$). При этом скорость накопления Hg в мышечной ткани леща выше в Чебоксарском водохранилище, тогда как для плотвы скорость накопления выше в Горьковском водохранилище.

В целом выявленные закономерности отражают комплексное влияние гидрологических, трофических и видоспецифических факторов на процессы накопления ртути и подтверждают необходимость учета как межводоемных различий, так и структуры популяций при экологической оценке загрязнения водных экосистем.

Библиография

- Аннотированный каталог круглоротых и рыб континентальных вод России / Под ред. Ю. С. Решетникова. М.: Наука, 1998. 218 с.
- Атлас пресноводных рыб России. М.: Наука, 2002а. Т. I. 379 с.
- Атлас пресноводных рыб России. М.: Наука, 2002б. Т. II. 253 с.
- 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. DOI: 10.55355/snv2024134101.
- Бикбулатов Э. С., Литвинов А. С., Степанова И. Э. и др. Гидролого-гидрохимические условия в Горьковском и Чебоксарском водохранилищах в летнюю межень 2001 г. // Экологическая химия. 2006. № 15 (2). С. 82–94.
- Брюзгин В. Л. Методы изучения роста рыб по чешуе, костям и отолитам. Киев: Наукова думка, 1969. 187 с.
- 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. 23–31.
- Гремячих В. А., Комов В. Т., Базаров М. И. и др. Пространственная вариабельность интенсивности накопления ртути в мышцах разноразмерного окуня Рыбинского водохранилища // Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. 2024. № 108 (111). С. 7–19. DOI: 10.47021/0320-3557-2025-7-19.
- Гремячих В. А., Ложкина Р. А., Котиков Д. Э., Комов В. Т. Концентрации ртути в мышцах разных видов рыб из водоемов Ярославской области и прилегающих территорий // Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. 2022. Вып. 100 (103). С. 35–56.
- Комов В. Т., Гремячих В. А., Ершов П. Н. Сравнительное содержание ртути в мышцах рыб водоемов севера европейской России // Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера: Материалы XXVIII международной конференции. Петрозаводск, 2009. С. 289–292.
- Копылов А. И., Лазарева В. И., Минеева Н. М., Заботкина Е. А. Планктонное сообщество крупного эвтрофного водохранилища в период аномально высокой температуры воды // Биология внутренних вод. 2020. № 4. С. 315–324. DOI: 10.31857/S0320965220040099.
- Корнева Л. Г., Соловьева В. В., Макарова О. С. Современное состояние фитопланктона водохранилищ рек Волги, Камы, Дона и Волго-Донского канала (лето 2015–2018 гг.) в условиях меняющегося климата и продолжающегося эвтрофирования // Биология внутренних вод. 2025. Т. 18, № 1. С. 27–45. DOI: 10.31857/S0320965225010031.
- Котляр О. А. Методы рыбохозяйственных исследований (ихтиология). Рыбное: Дмитровский филиал АГТУ, 2004. 180 с.
- Лазарева В. И., Сабитова Р. З., Быкова С. В. и др. Распределение летнего зоопланктона в каскаде водохранилищ Волги и Камы // Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН. 2018. № 83 (86). С. 62–84. DOI: 10.24411/0320-3557-2018-10030.
- Минеева Н. М., Поддубный С. А., Степанова И. Э. и др. Абиотические факторы и их роль в развитии фитопланктона Средней Волги // Биология внутренних вод. 2022. № 6. С. 640. DOI: 10.31857/S0320965222060158.
- Минеева Н. М. Эколого-физиологические аспекты формирования первичной продукции планктона водохранилищ Волги: Автореф. дисс. д-ра биол. наук. Н. Новгород, 2003. 42 с.
- Минин А. Е., Минина Л. М., Катаев Р. К. и др. Пространственное распределение трофности в Горьковском и Чебоксарском водохранилищах // Рыбохозяйственная наука. История, современность, перспективы: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 110-летию создания «ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга (Санкт-Петербург, 23–24 октября 2024 г.). М.: ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО», 2024. С. 398–401.
- Паюта А. А., Флерова Е. А., Гульдина Д. А. и др. Связь размерно-массовых характеристик и концентрации ртути в мышечной ткани пресноводных рыб тропического Вьетнама // Биология внутренних вод. 2024. Т. 17, № 2. С. 276–285. DOI: 10.31857/S0320965224020065.
- Правдин И. Ф. Руководство по изучению рыб (преимущественно пресноводных) / Под ред. проф. П. А. Дрягина и канд. биол. наук В. В. Покровского. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Пищ. пром-сть, 1966. 376 с.
- Ревухин А. А., Воронин Р. Е., Постнов Д. И. и др. Содержание ртути (Hg) в мышцах рыб Горьковского водохранилища в зависимости от массы тела // Проблемы экологии Волжского бассейна: Материалы конференции. Н. Новгород, 2024. С. 20.
- Ревухин А. А., Постнов Д. И., Гремячих В. А. и др. Зависимость содержания ртути в мышечной ткани рыб Горьковского водохранилища от возраста и длины тела // Поволжский экологический журнал. 2025. № 2. С. 232–239. DOI: 10.35885/1684-7318-2025-2-232-239.
- Тимофеева Н. А., Сигарева Л. Е., Законнов В. В. Вариабельность трофии донных биотопов Горьков-

- ского водохранилища по осадочным пигментам // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, № 1. С. 70–79. DOI: 10.31857/S0321059621010272.
- Тропин Н. Ю., Борисов М. Я., Угрюмова Е. В. и др. Содержание ртути в мышечной ткани речного окуня крупных водоемов Вологодской области // Токсикологический вестник. 2019. № 2. С. 53–58. DOI: 10.36946/0869-7922-2019-2-53-58.
- Шурганова Г. В. Динамика видовой структуры зоопланктоценозов в водохранилищах Средней Волги: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Н. Новгород, 2007. 48 с.
- Allard B., Arsenie I. Abiotic reduction of mercury by humic substances in aquatic systems: an important process for the mercury cycle // Water, Air, and Soil Pollution. 1991. Vol. 56. P. 457–464.
- Amyot M., Mierle G., Lean D. R. S., McQueen D. J. Sunlight-induced formation of dissolved gaseous mercury in lake waters // Environmental Science & Technology. 1994. Vol. 28. P. 2366–2371.
- Backstrom C. H., Buckman K., Molden E., Chen C. Y. Mercury levels in freshwater fish: estimating concentration with fish length to determine exposures through fish consumption // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2020. Vol. 78. P. 604–621. DOI: 10.1007/s00244-020-00717-y.
- Benoit J. M., Gilmour C. C., Heyes A., Mason R. P., Miller C. L. Geochemical and biological controls over methylmercury production and degradation in aquatic ecosystems // Biogeochemistry of Environmentally Important Trace Elements. Washington: American Chemical Society, 2003. P. 262–297.
- Chen C. Y., Folt C. L. High plankton densities reduce mercury biomagnification // Environmental Science & Technology. 2005. Vol. 39, No 1. P. 115–121.
- Clayden M. G., Kidd K. A., Wyn B. et al. Ecological drivers of mercury bioaccumulation in fish // Environmental Toxicology and Chemistry. 2023. Vol. 42. P. 873–885.
- Dang F., Wang W. X. Why mercury concentration increases with fish size? Biokinetic explanation // Environmental Pollution. 2012. Vol. 163. P. 192–198. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.12.026.
- Depew D. C., Burgess N. M., Anderson M. R. et al. An overview of mercury concentrations in freshwater fish species: a national fish mercury dataset for Canada // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2013. Vol. 70. P. 436–451.
- Eagles-Smith C. A., Willacker J. J., Flanagan Pritz C. M. Mercury in fishes from 21 national parks in the Western United States: inter- and intra-park variation in concentrations and ecological risk // U.S. Geological Survey Open-File Report. 2014. No 2014–1051. P. 54.
- Eagles-Smith C. A., Silbergeld E. K., Basu N. et al. Modulators of mercury risk to wildlife and humans in the context of rapid global change // AMBIO. 2018. Vol. 47. P. 170–197. DOI: 10.1007/s13280-017-1011-x.
- Fioravanti R., Muzzioli L., Maurel E. et al. Bioaccumulation and biomagnification of mercury along the seafood chain in Europe: a systematic review // Foods. 2025. Vol. 14, No 21. P. 3752. DOI: 10.3390/foods14213752.
- Gedig D. P., Hauger M., Armstrong D. A., Jeffries K. M. Mercury contamination of an introduced generalist fish of intermediate trophic level // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2023. Vol. 85. P. 13–24. DOI: 10.1007/s00244-023-01004-2.
- Hammerschmidt C. R., Fitzgerald W. F. Iron-mediated photochemical decomposition of methylmercury in an Arctic Alaskan lake // Environmental Science & Technology. 2010. Vol. 44. P. 6138–6143.
- Ivanova E. S., Eltsova L. S., Komov V. T. et al. Assessment of the consumptive safety of mercury in fish from the surface waters of the Vologda region in northwestern Russia // Environmental Geochemistry and Health. 2023. Vol. 45. No 3. P. 863–879. DOI: 10.1007/s10653-022-01254-4.
- Julian P., Gu B. Mercury accumulation in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) within marsh ecosystems of the Florida Everglades, USA // Ecotoxicology. 2014. Vol. 24. P. 202–214. DOI: 10.1007/s10646-014-1373-9.
- Kamman N. C., Burgess N. M., Driscoll C. T. et al. Mercury in freshwater fish of Northeast North America: a geographic perspective based on fish tissue monitoring databases // Ecotoxicology. 2005. Vol. 14. P. 163–180.
- Karagas M. R., Choi A. L., Oken E. et al. Evidence on the human health effects of low-level methylmercury exposure // Environmental Health Perspectives. 2012. Vol. 120. P. 799–806.
- Karimi R., Chen C. Y., Pickhardt P. C. et al. Stoichiometric controls of mercury dilution by growth // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2007. Vol. 104. P. 7477–7482. DOI: 10.1073/pnas.0611261104.
- Kidd K. A., Muir D. C. G., Evans M. S. et al. Biomagnification of mercury through lake trout (*Salvelinus namaycush*) food webs of lakes with different physical, chemical and biological characteristics // Science of the Total Environment. 2012. Vol. 438. P. 135–143. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.08.057.
- Kirk J. T. O. Optics of UV-B radiation in natural waters // Archiv für Hydrobiologie. Beihefte Ergebnisse der Limnologie. 1994. Vol. 43. P. 1–16.
- Lavoie R. A., Jardine T. D., Chumchal M. M. et al. Biomagnification of mercury in aquatic food webs: a

- worldwide meta-analysis // *Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47. P. 13385–13394. DOI: 10.1021/es403103t.
- Lean D. R. S. Attenuation of solar radiation in humic waters // In: Hessen D. O., Tranvik L. J. (eds.). *Aquatic Humic Substances*. New York: Springer-Verlag, 1998. P. 109–124.
- Lenth R., Piaskowski J. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 2.0.3. 2026. URL: <https://rvlenth.github.io/emmeans/>
- Liu G., Cai Y., O'Driscoll N. J. *Environmental chemistry and toxicology of mercury*. Hoboken: Wiley, 2011.
- Mergler D., Anderson H. A., Chan L. H. et al. Methylmercury exposure and health effects in humans: a worldwide concern // *AMBIO*. 2007. Vol. 36. P. 3–11.
- Miller E. K., Chen C., Kamman N. C. et al. Mercury in the pelagic food web of Lake Champlain // *Ecotoxicology*. 2012. Vol. 21. P. 705–718. DOI: 10.1007/s10646-011-0829-4.
- Mills N., Cashatt D., Weber M. J., Pierce C. L. A case study and a meta-analysis of seasonal variation in fish mercury concentrations // *Ecotoxicology*. 2018. Vol. 27. P. 641–649. DOI: 10.1007/s10646-018-1942-4.
- Mills N., Weber M. J., Cashatt D. et al. Factors related to fish mercury concentrations in Iowa lakes // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2022. Vol. 194. P. 721. DOI: 10.1007/s10661-022-10427-8.
- O'Driscoll N. J., Beauchamp S., Rencz A. N., Lean D. R. S. Continuous analysis of dissolved gaseous mercury (DGM) and mercury flux in two freshwater lakes in Kejimikujik National Park, Nova Scotia, evaluating mercury flux models with quantitative data // *Environmental Science & Technology*. 2003a. Vol. 37. P. 2226–2235.
- O'Driscoll N. J., Poissant L., Canário J. et al. Continuous analysis of dissolved gaseous mercury and mercury volatilization in the upper St. Lawrence River: exploring temporal relationships and UV attenuation // *Environmental Science & Technology*. 2007. Vol. 41. P. 5342–5348.
- O'Driscoll N. J., Rencz A. N., Lean D. R. S. (eds.). *Mercury cycling in a wetland dominated ecosystem: a multidisciplinary study*. Pensacola (FL): SETAC Press, 2005b.
- O'Driscoll N. J., Siciliano S. D., Lean D. R. S. Continuous analysis of dissolved gaseous mercury in freshwater lakes // *Science of the Total Environment*. 2003b. Vol. 304. P. 285–294.
- O'Driscoll N. J., Rencz A. N., Lean D. R. S. The biogeochemistry and fate of mercury in natural environments // Sigel A., Sigel H., Sigel R. K. O. (eds.). *Metal Ions in Biological Systems*. Vol. 43. New York: Marcel Dekker, 2005a.
- Obrist D., Kirk J. L., Zhang L. et al. A review of global environmental mercury processes in response to human and natural perturbations: changes of emissions, climate, and land use // *AMBIO*. 2018. Vol. 47. P. 116–140. DOI: 10.1007/s13280-017-1004-9.
- Pickhardt P. C., Folt C. L., Chen C. Y., Klaue B., Blum J. D. Algal blooms reduce the uptake of toxic methylmercury in freshwater food webs // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 2002. Vol. 99. P. 4419–4423.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025.
- Sackett D. K., Cope G. W., Rice J. A., Aday D. D. The influence of fish length on tissue mercury dynamics: implications for natural resource management and human health risk // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2013. Vol. 10. P. 638–659. DOI: 10.3390/ijerph10020638.
- Sellers P., Kelly C. A., Rudd J. W. M., MacHutchon A. R. Photodegradation of methylmercury in lakes // *Nature*. 1996. Vol. 380. P. 694–697.
- Siciliano S. D., O'Driscoll N. J., Tordon R. et al. Abiotic production of methylmercury by solar radiation // *Environmental Science & Technology*. 2005. Vol. 39. P. 1071–1077.
- Sullivan C. J., Vokoun J. C., Perkins C. R. Spatiotemporal changes in largemouth bass mercury concentrations from Connecticut waterbodies, 1995–2021 // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023. Vol. 195. P. 780. DOI: 10.1007/s10661-023-11405-4.
- Udodenko Y. G., Komov V. T., Zakonnov V. V. Total mercury in surficial bottom sediments of Volga River reservoirs in Central Russia // *Environmental Earth Sciences*. 2018. Vol. 77, No 19. P. 692. DOI: 10.1007/s12665-018-7876-6.
- Visnjevec A., Kocman D., Horvat M. Human mercury exposure and effects in Europe // *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2014. Vol. 33, No 6. P. 1259–1270.
- Ward D. M., Nislow K. H., Chen C. Y., Folt C. L. Reduced trace element concentrations in fast-growing juvenile Atlantic salmon in natural streams // *Environmental Science & Technology*. 2010. Vol. 44. P. 3245–3251. DOI: 10.1021/es902639a.
- Xiao Z. F., Stromberg D., Lindqvist O. Influence of humic substances on photolysis of divalent mercury in aqueous solution // *Water, Air, and Soil Pollution*. 1995. Vol. 80. P. 789–798.

MERCURY ACCUMULATION RATE IN THE MUSCLES OF COMMERCIAL FISH SPECIES OF THE GORKY AND CHEBOKSARY RESERVOIRS

REVUKHIN
Alexander Andreevich

Nizhny Novgorod branch of the Federal State Budget Scientific Institution “Russian Federal Research Institute of Fisheries and oceanography”, 31, Moskovskoe highway, Nizhny Novgorod, 603116, Russia, cahek19981110@gmail.com

YAKIMOV
Vasily Nikolaevich

DSc, Nizhny Novgorod State University, 23, Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603950, Russia, damselfly@yandex.ru

KUDRIN
Ivan Aleksandrovich

PhD, Nizhny Novgorod State University, 236 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603950, Russia, kudriniv@mail.ru

SHURGANOVA
Galina Vasilevna

DSc, Nizhny Novgorod State University, 23 Gagarin Ave., Nizhny Novgorod, 603950, Russia, galina.nngu@mail.ru

KOMOV
Victor Trofimovich

DSc, I. D. Papanin Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences, Russia, 152742, Yaroslavl region, Nekouzsky district, village Borok, vkomov@ibiw.ru

Key words:

mercury
Hg
mercury content
fish
accumulation rate
body length
Gorky reservoir
Cheboksary reservoir
environmental
monitoring

Summary: The paper provides a comparative assessment of the intensity of mercury (Hg) accumulation in the muscle tissue of commercial fish species (perch, roach, bream, silver bream) of the Gorky and Cheboksary reservoirs of the Middle Volga. The research was carried out based on the analysis of 1239 fish specimens selected in 2023, 2024 and 2025. Mercury concentration was determined by atomic absorption spectrometry. To estimate the rate of Hg accumulation, a multivariate linear model of the “Hg – body length” relationship was used, taking into account the species and reservoir. It was found that the mercury content significantly depended on the body length of fish, their species and the conditions of the reservoir ($p < 0.001$). Differences in the rate of mercury accumulation between species, as well as between reservoirs, were revealed. In Cheboksary reservoir, Hg concentrations in the sample of the studied fish species were generally higher than in Gorky reservoir. It was shown that the differences in accumulation were related not only to the level of pollution, but also to the peculiarities of the hydrological regime and trophic conditions determining the bioavailability of mercury and the effectiveness of its transfer. The analysis of the factors defining the differences in the content and accumulation of bioavailable methyl mercury by fish was carried out between the Gorky and Cheboksary reservoirs. The highest accumulation rate was observed in perch, the lowest - in bream. It was shown that interspecies differences in mercury accumulation were water-dependent, which was confirmed by the significance of a three-factor analysis. The obtained results demonstrate that the studied dependencies are an informative indicator of the dynamics of mercury bioaccumulation and can be used for ecological monitoring of aquatic ecosystems.

Received on: 11 May 2026

Published on: 26 June 2026

References

- Allard B., Arsenie I. Abiotic reduction of mercury by humic substances in aquatic systems: an important process for the mercury cycle, *Water, Air, and Soil Pollution*. 1991. Vol. 56. P. 457–464.
- Amyot M., Mierle G., Lean D. R. S., McQueen D. J. Sunlight-induced formation of dissolved gaseous mercury in lake waters, *Environmental Science & Technology*. 1994. Vol. 28. P. 2366–2371.
- An annotated catalog of cyclostomes and fishes of the continental waters of Russia., Pod red. Yu. P.

- Reshetnikova. M.: Nauka, 1998. 218 p.
- Atlas of freshwater fishes of Russia.M.: Nauka, 2002a. T. I . 379 p.
- Atlas of freshwater fishes of Russia.M.: Nauka, 2002b. T. II. 253 p.
- Backstrom C. H., Buckman K., Molden E., Chen C. Y. Mercury levels in freshwater fish: estimating concentration with fish length to determine exposures through fish consumption, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2020. Vol. 78. P. 604–621. DOI: 10.1007/s00244-020-00717-y.
- Bazhenova D. E. Kapustina V. Yu. Ivanova E. S. Mercury content in fish organs of different reservoirs of the Ustyuzhensky district of the Vologda region, *Samarskiy nauchnyy vestnik*. 2024. T. 13, No. 4. P. 8–13. DOI: 10.55355/snv2024134101.
- Benoit J. M., Gilmour C. C., Heyes A., Mason R. P., Miller C. L. Geochemical and biological controls over methylmercury production and degradation in aquatic ecosystems, *Biogeochemistry of Environmentally Important Trace Elements*. Washington: American Chemical Society, 2003. P. 262–297.
- Bikbulatov E. S. Litvinov A. S. Stepanova I. E. Hydrological and hydrochemical conditions in Gorky and Cheboksary reservoirs in the summer of 2001, *Ekologicheskaya himiya*. 2006. No. 15 (2). P. 82–94.
- Bryuzgin V. L. Methods for studying fish growth by scales, bones, and otoliths. Kiev: Naukova dumka, 1969. 187 p.
- Chen C. Y., Folt C. L. High plankton densities reduce mercury biomagnification, *Environmental Science & Technology*. 2005. Vol. 39, No 1. P. 115–121.
- Clayden M. G., Kidd K. A., Wyn B. et al. Ecological drivers of mercury bioaccumulation in fish, *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2023. Vol. 42. P. 873–885.
- Dang F., Wang W. X. Why mercury concentration increases with fish size? Biokinetic explanation, *Environmental Pollution*. 2012. Vol. 163. P. 192–198. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.12.026.
- Depew D. C., Burgess N. M., Anderson M. R. et al. An overview of mercury concentrations in freshwater fish species: a national fish mercury dataset for Canada, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2013. Vol. 70. P. 436–451.
- Eagles-Smith C. A., Silbergeld E. K., Basu N. et al. Modulators of mercury risk to wildlife and humans in the context of rapid global change, *AMBIO*. 2018. Vol. 47. P. 170–197. DOI: 10.1007/s13280-017-1011-x.
- Eagles-Smith C. A., Willacker J. J., Flanagan Pritz C. M. Mercury in fishes from 21 national parks in the Western United States: inter- and intra-park variation in concentrations and ecological risk, U.S. Geological Survey Open-File Report. 2014. No 2014–1051. P. 54.
- Fioravanti R., Muzzioli L., Maurel E. et al. Bioaccumulation and biomagnification of mercury along the seafood chain in Europe: a systematic review, *Foods*. 2025. Vol. 14, No 21. P. 3752. DOI: 10.3390/foods14213752.
- Gedig D. P., Hauger M., Armstrong D. A., Jeffries K. M. Mercury contamination of an introduced generalist fish of intermediate trophic level, *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2023. Vol. 85. P. 13–24. DOI: 10.1007/s00244-023-01004-2.
- Gorbunov A. V. Lyapunov S. M. Okina O. I. Sheshukov V. S. Bioaccumulation of mercury in freshwater fish tissues, *Ekologiya cheloveka*. 2018. T. 25, No. 11. P. 23–31.
- Greymachih V. A. Komov V. T. Bazarov M. I. Spatial variability in the intensity of mercury accumulation in the muscles of a multi-sized perch of the Rybinsk reservoir, *Trudy Instituta biologii vnutrennih vod im. I. D. Papanina RAN*. 2024. No. 108 (111). P. 7–19. DOI: 10.47021/0320-3557-2025-7-19.
- Greymachih V. A. Lozhkina R. A. Kotikov D. E. Komov V. T. Mercury concentrations in the muscles of various fish species from reservoirs of the Yaroslavl region and adjacent territories, *Trudy Instituta biologii vnutrennih vod im. I. D. Papanina RAN*. 2022. Vyp. 100 (103). P. 35–56.
- Hammerschmidt C. R., Fitzgerald W. F. Iron-mediated photochemical decomposition of methylmercury in an Arctic Alaskan lake, *Environmental Science & Technology*. 2010. Vol. 44. P. 6138–6143.
- Ivanova E. S., Eltsova L. S., Komov V. T. et al. Assessment of the consumptive safety of mercury in fish from the surface waters of the Vologda region in northwestern Russia, *Environmental Geochemistry and Health*. 2023. Vol. 45. No 3. P. 863–879. DOI: 10.1007/s10653-022-01254-4.
- Julian P., Gu B. Mercury accumulation in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) within marsh ecosystems of the Florida Everglades, USA, *Ecotoxicology*. 2014. Vol. 24. P. 202–214. DOI: 10.1007/s10646-014-1373-9.
- Kamman N. C., Burgess N. M., Driscoll C. T. et al. Mercury in freshwater fish of Northeast North America: a geographic perspective based on fish tissue monitoring databases, *Ecotoxicology*. 2005. Vol. 14. P. 163–180.
- Karagas M. R., Choi A. L., Oken E. et al. Evidence on the human health effects of low-level methylmercury exposure, *Environmental Health Perspectives*. 2012. Vol. 120. P. 799–806.
- Karimi R., Chen C. Y., Pickhardt P. C. et al. Stoichiometric controls of mercury dilution by growth, *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2007. Vol. 104. P. 7477–7482. DOI: 10.1073/

- pnas.0611261104.
- Kidd K. A., Muir D. C. G., Evans M. S. et al. Biomagnification of mercury through lake trout (*Salvelinus namaycush*) food webs of lakes with different physical, chemical and biological characteristics, *Science of the Total Environment*. 2012. Vol. 438. P. 135–143. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.08.057.
- Kirk J. T. O. Optics of UV-B radiation in natural waters, *Archiv für Hydrobiologie. Beihefte Ergebnisse der Limnologie*. 1994. Vol. 43. P. 1–16.
- Komov V. T. Gremyachih V. A. Ershov P. N. Comparative mercury content in fish muscles of reservoirs in the north of European Russia, *Biologicheskie resursy Belogo morya i vnutrennih vodoemov Evropeyskogo Severa: Materialy XXVIII mezhdunarodnoy konferencii*. Petrozavodsk, 2009. P. 289–292.
- Kopylov A. I. Lazareva V. I. Mineeva N. M. Zobotkina E. A. Planktonic community of a large eutrophic reservoir during the period of abnormally high water temperature, *Biologiya vnutrennih vod*. 2020. No. 4. P. 315–324. DOI: 10.31857/S0320965220040099.
- Korneva L. G. Solov'eva V. V. Makarova O. S. The current state of phytoplankton in reservoirs of the Volga, Kama, Don rivers, and Volga-Don Canal (summer 2015-2018) under conditions of changing climate and ongoing eutrophication, *Biologiya vnutrennih vod*. 2025. T. 18, No. 1. P. 27–45. DOI: 10.31857/S0320965225010031.
- Kotlyar O. A. *Methods of fisheries research (ichthyology)*. Rybnoe: Dmitrovskiy filial AGTU, 2004. 180 p.
- Lavoie R. A., Jardine T. D., Chumchal M. M. et al. Biomagnification of mercury in aquatic food webs: a worldwide meta-analysis, *Environmental Science & Technology*. 2013. Vol. 47. P. 13385–13394. DOI: 10.1021/es403103t.
- Lazareva V. I. Sabitova R. Z. Bykova S. V. Distribution of summer zooplankton in the cascade of Volga and Kama reservoirs, *Trudy Instituta biologii vnutrennih vod im. I. D. Papanina RAN*. 2018. No. 83 (86). P. 62–84. DOI: 10.24411/0320-3557-2018-10030.
- Lean D. R. S. Attenuation of solar radiation in humic waters, In: Hessen D. O., Tranvik L. J. (eds.). *Aquatic Humic Substances*. New York: Springer-Verlag, 1998. P. 109–124.
- Lenth R., Piaskowski J. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 2.0.3. 2026. URL: <https://rvlenth.github.io/emmeans/>
- Liu G., Cai Y., O'Driscoll N. J. *Environmental chemistry and toxicology of mercury*. Hoboken: Wiley, 2011.
- Mergler D., Anderson H. A., Chan L. H. et al. Methylmercury exposure and health effects in humans: a worldwide concern, *AMBIO*. 2007. Vol. 36. P. 3–11.
- Miller E. K., Chen C., Kamman N. C. et al. Mercury in the pelagic food web of Lake Champlain, *Ecotoxicology*. 2012. Vol. 21. P. 705–718. DOI: 10.1007/s10646-011-0829-4.
- Mills N., Cashatt D., Weber M. J., Pierce C. L. A case study and a meta-analysis of seasonal variation in fish mercury concentrations, *Ecotoxicology*. 2018. Vol. 27. P. 641–649. DOI: 10.1007/s10646-018-1942-4.
- Mills N., Weber M. J., Cashatt D. et al. Factors related to fish mercury concentrations in Iowa lakes, *Environmental Monitoring and Assessment*. 2022. Vol. 194. P. 721. DOI: 10.1007/s10661-022-10427-8.
- Mineeva N. M. Poddubnyy S. A. Stepanova I. E. Abiotic factors and their role in the development of phytoplankton of the Middle Volga, *Biologiya vnutrennih vod*. 2022. No. 6. P. 640. DOI: 10.31857/S0320965222060158.
- Mineeva N. M. Ecological and physiological aspects of the formation of primary plankton production in Volga reservoirs: Avtoref. disp. d-ra biol. nauk. N. Novgorod, 2003. 42 p.
- Minin A. E. Minina L. M. Kataev R. K. Spatial distribution of trophicity in Gorky and Cheboksary reservoirs, *Rybohozyaystvennaya nauka. Istoriya, sovremennost', perspektivy: Materialy Mezhdunar. nauch. prakt. konf., posvyasch. 110-letiyu sozdaniya «GosNIORH» im. L. P. Berga (Sankt-Peterburg, 23–24 oktyabrya 2024 g.)*. M.: GNC RF FGBNU «VNIRO», 2024. P. 398–401.
- O'Driscoll N. J., Beauchamp S., Rencz A. N., Lean D. R. S. Continuous analysis of dissolved gaseous mercury (DGM) and mercury flux in two freshwater lakes in Kejimikujik National Park, Nova Scotia, evaluating mercury flux models with quantitative data, *Environmental Science & Technology*. 2003a. Vol. 37. P. 2226–2235.
- O'Driscoll N. J., Poissant L., Canário J. et al. Continuous analysis of dissolved gaseous mercury and mercury volatilization in the upper St. Lawrence River: exploring temporal relationships and UV attenuation, *Environmental Science & Technology*. 2007. Vol. 41. P. 5342–5348.
- O'Driscoll N. J., Rencz A. N., Lean D. R. S. (eds.). *Mercury cycling in a wetland dominated ecosystem: a multidisciplinary study*. Pensacola (FL): SETAC Press, 2005b.
- O'Driscoll N. J., Rencz A. N., Lean D. R. S. The biogeochemistry and fate of mercury in natural environments, Sigel A., Sigel H., Sigel R. K. O. (eds.). *Metal Ions in Biological Systems*. Vol. 43. New York: Marcel Dekker, 2005a.
- O'Driscoll N. J., Siciliano S. D., Lean D. R. S. Continuous analysis of dissolved gaseous mercury in freshwater lakes, *Science of the Total Environment*. 2003b. Vol. 304. P. 285–294.

- Obrist D., Kirk J. L., Zhang L. et al. A review of global environmental mercury processes in response to human and natural perturbations: changes of emissions, climate, and land use, *AMBIO*. 2018. Vol. 47. P. 116–140. DOI: 10.1007/s13280-017-1004-9.
- Payuta A. A. Flerova E. A. Gul'dina D. A. Relationship of size-mass characteristics and mercury concentration in the muscle tissue of freshwater fish of tropical Vietnam, *Biologiya vnutrennih vod*. 2024. T. 17, No. 2. P. 276–285. DOI: 10.31857/S0320965224020065.
- Pickhardt P. C., Folt C. L., Chen C. Y., Klaue B., Blum J. D. Algal blooms reduce the uptake of toxic methylmercury in freshwater food webs, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 2002. Vol. 99. P. 4419–4423.
- Pravdin I. F. Guidelines for the study of fish (mainly freshwater), *Pod red. prof. P. A. Dryagina i kand. biol. nauk V. V. Pokrovskogo*. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Pisch. prom-st', 1966. 376 p.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025.
- Revuhin A. A. Postnov D. I. Gremyachih V. A. Dependence of mercury content in muscle tissue of fish of Gorky reservoir on age and body length, *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal*. 2025. No. 2. P. 232–239. DOI: 10.35885/1684-7318-2025-2-232-239.
- Revuhin A. A. Voronin R. E. Postnov D. I. Mercury (Hg) content in the muscles of fish of the Gorky reservoir, depending on body weight, *Problemy ekologii Volzhskogo basseyna: Materialy konferencii*. N. Novgorod, 2024. P. 20.
- Sackett D. K., Cope G. W., Rice J. A., Aday D. D. The influence of fish length on tissue mercury dynamics: implications for natural resource management and human health risk, *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2013. Vol. 10. P. 638–659. DOI: 10.3390/ijerph10020638.
- Sellers P., Kelly C. A., Rudd J. W. M., MacHutchon A. R. Photodegradation of methylmercury in lakes, *Nature*. 1996. Vol. 380. P. 694–697.
- Shurganova G. V. Dynamics of the species structure of zooplanktonocenoses in reservoirs of the Middle Volga: *Avtoref. dip. ... d-ra biol. nauk*. N. Novgorod, 2007. 48 p.
- Siciliano S. D., O'Driscoll N. J., Tordon R. et al. Abiotic production of methylmercury by solar radiation, *Environmental Science & Technology*. 2005. Vol. 39. P. 1071–1077.
- Sullivan C. J., Vokoun J. C., Perkins C. R. Spatiotemporal changes in largemouth bass mercury concentrations from Connecticut waterbodies, 1995–2021, *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023. Vol. 195. P. 780. DOI: 10.1007/s10661-023-11405-4.
- Timofeeva N. A. Sigareva L. E. Zakonnov V. V. Variability of the trophy of bottom biotopes of the Gorky reservoir by sedimentary pigments, *Vodnye resursy*. 2021. T. 48, No. 1. P. 70–79. DOI: 10.31857/S0321059621010272.
- Tropin N. Yu. Borisov M. Ya. Ugryumova E. V. Mercury content in the muscle tissue of river perch in large reservoirs of the Vologda region, *Toksikologicheskiy vestnik*. 2019. No. 2. P. 53–58. DOI: 10.36946/0869-7922-2019-2-53-58.
- Udodenko Y. G., Komov V. T., Zakonnov V. V. Total mercury in surficial bottom sediments of Volga River reservoirs in Central Russia, *Environmental Earth Sciences*. 2018. Vol. 77, No 19. P. 692. DOI: 10.1007/s12665-018-7876-6.
- Visnjevec A., Kocman D., Horvat M. Human mercury exposure and effects in Europe, *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2014. Vol. 33, No 6. P. 1259–1270.
- Ward D. M., Nislow K. H., Chen C. Y., Folt C. L. Reduced trace element concentrations in fast-growing juvenile Atlantic salmon in natural streams, *Environmental Science & Technology*. 2010. Vol. 44. P. 3245–3251. DOI: 10.1021/es902639a.
- Xiao Z. F., Stromberg D., Lindqvist O. Influence of humic substances on photolysis of divalent mercury in aqueous solution, *Water, Air, and Soil Pollution*. 1995. Vol. 80. P. 789–798.