



DOI 10.23859/estr-220505

EDN ESYLRF

УДК 597.1.05:574.64

*Научная статья*

## **Влияние хронического поступления малых доз ртути на некоторые биохимические показатели липидного и белкового обмена у серебряного карася *Carassius auratus* (L., 1758)**

Д.В. Гарина 

*Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, 152742, Россия, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 109*

*darina@ibiw.ru*

**Аннотация.** Изучено влияние ртути, поступавшей с кормом в течение трех месяцев, на некоторые биохимические показатели сыворотки крови серебряного карася *Carassius auratus* (L., 1758): концентрацию общего белка, общего холестерина и липопротеинов высокой плотности. Содержание ртути в мышцах рыб группы, потреблявшей корм с повышенным содержанием ртути («ВР»), возросло в 5,8, 10,4 и 11,7 раза, с пониженным содержанием («НР») – в 1,4, 3,2 и 3,2 раза через 1, 2 и 3 месяца соответственно ( $p < 0.05$ ). Накопление ртути приводило к возрастанию всех изученных показателей; максимально увеличивался уровень общего холестерина у рыб опытной группы к концу эксперимента (в 3,1 раза). При этом показана достоверная положительная связь биохимических показателей крови с содержанием ртути в мышцах рыб. Полученные результаты свидетельствуют о возникновении изменений в липидном и белковом метаболизме рыб под воздействием ртути, степень выраженности которых зависит от количества ртути в корме и длительности эксперимента.

**Ключевые слова:** рыбы, тяжелые металлы, сыворотка крови, общий белок, общий холестерин, липопротеины высокой плотности

**ORCID:**

Д.В. Гарина, <https://orcid.org/0000-0002-3128-0872>

**Финансирование:** Исследование выполнено в рамках госзадания, тема № 121050500046-8.

**Благодарности:** Автор выражает глубокую благодарность за помощь коллегам: И.Л. Головановой, В.Т. Комову, Ю.Г. Удоденко, Е.В. Щедровой, А.В. Ворошилову, Е.А. Куливацкой, А.С. Васильеву, Р.А. Фёдорову, М.И. Замысловой, Э.В. Гарину, А.А. Филиппову, А.К. Смирнову.

**Для цитирования:** Гарина, Д.В., 2023. Влияние хронического поступления малых доз ртути на некоторые биохимические показатели липидного и белкового обмена у серебряного карася *Carassius auratus* (L., 1758). *Трансформация экосистем* 6 (3), 86–104. <https://doi.org/10.23859/estr-220505>

Поступила в редакцию: 05.05.2022

Принята к печати: 18.08.2022

Опубликована онлайн: 31.08.2023

DOI 10.23859/estr-220505

EDN ESYLRF

UDC 597.1.05:574.64

*Article***Influence of chronic intake of small doses of mercury on some biochemical parameters of lipid and protein metabolism in goldfish *Carassius auratus* (L., 1758)**Darina V. Garina *Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok 109, Nekouzsky District, Yaroslavl Oblast, 152742 Russia**darina@ibiw.ru*

**Abstract.** The effect of mercury, supplied with food for three months, was studied on some biochemical parameters (concentration of total protein, total cholesterol, and high-density lipoproteins) of the blood serum of goldfish *Carassius auratus* (L., 1758). The content of mercury in the muscles of the fish that consumed the food with a high content of mercury ("HM") increased by 5.8, 10.4, and 11.7 times, with a low content ("LM"), by 1.4, 3.2, and 3.2 times after 1, 2, and 3 months, respectively ( $p < 0.05$ ). Accumulation of mercury resulted in increasing of all the studied parameters; the total cholesterol concentration increased to the maximum in the fish of the experimental group by the end of the experiment (by 3.1 times). At the same time, there was a significant positive relationship between the biochemical parameters of blood and the mercury content in the fish muscles. The obtained results indicated significant changes in the lipid and protein metabolism of fish under the influence of mercury, their intensity depended on the amount of mercury in the feed and the exposure time.

**Keywords:** fish, heavy metals, blood serum, total protein, total cholesterol, high-density lipoproteins

**ORCID:**D.V. Garina, <https://orcid.org/0000-0002-3128-0872>

**Funding:** The study was carried out within the framework of the State Task no. 121050500046-8.

**Acknowledgements:** The author expresses her deep gratitude for the invaluable help to I.L. Golovanova, V.T. Komov, Yu.G. Udodenko, E.V. Shchedrova, A.V. Voroshilov, E.A. Kulivatskaya, A.S. Vasiliev, R.A. Fedorov, M.I. Zamyslova, E.V. Garin, A.A. Filippov, and A.K. Smirnov.

**To cite this article:** Garina, D.V., 2023. Influence of chronic intake of small doses of mercury on some biochemical parameters of lipid and protein metabolism in goldfish *Carassius auratus* (L., 1758). *Ecosystem Transformation* 6 (3), 86–104. <https://doi.org/10.23859/estr-220505>

Received: 05.05.2022

Accepted: 18.08.2022

Published online: 31.08.2023

## Введение

Исследования влияния токсикантов различной природы на биоту наземных и водных экосистем ведутся на различных уровнях организации живой природы, в том числе биохимическом и молекулярном (Немова, 2005). Тяжелые металлы обладают выраженной токсичностью для большинства живых организмов и считаются наиболее опасными загрязнителями водной среды, поскольку не подвергаются естественному разложению и накапливаются в донных отложениях и гидробионтах. Среди тяжелых металлов особое место занимает ртуть в силу высокой токсичности, разнообразия форм и повышенной способности к биопереносу в окружающей среде. Пары ртути, появляющиеся как из природных, так и из антропогенных источников, глобально распространены в атмосфере. Поступая с осадками на земную и водную поверхность, ртуть попадает в систему океанических и пресных континентальных водоемов и может мигрировать на большие расстояния (Clarkson, 2002; Fitzgerald et al., 1998).

В водных экосистемах благодаря сульфатредуцирующим бактериям, содержащимся в донных осадках, неорганическая ртуть превращается в более опасную органическую форму – метилртуть (Clarkson, 2002; Gilmour et al., 1992; Schäfer et al., 2010; Zhu et al., 2018 и др.), концентрация которой в съедобных тканях рыб составляет 50–98% от общего количества соединений ртути (Bloom, 1992; Carrasco et al., 2011). Соотношение концентраций метилртути и соединений неорганической ртути неодинаково в разных органах рыб. В частности, мышечная ткань рыб содержит 80–100% метилртути, тогда как в печени ее содержание может быть значительно меньше по сравнению с неорганическими соединениями этого элемента (Amlund et al., 2007; Batchelar et al., 2013; Olsvik et al., 2021).

Ртуть поступает в организм рыб через жабры, пищеварительную систему и (в меньшей степени) кожу. Металл проникает через эпителий органов в кровяное русло, связывается с белками плазмы и с током крови транспортируется во все ткани, где через клеточные мембраны поступает внутрь клеток (Erickson et al., 2008). Соединения ртути вызывают замедление роста рыб, эндокринные нарушения, снижение успешности нереста, подавление иммунитета и повреждение таких органов, как печень и почки (Klaper et al., 2008; Morcillo et al., 2017), сердечно-сосудистой системы (Monteiro et al., 2013), нервной системы (Berntssen et al., 2003), ухудшение вылупления, выживания и роста эмбрионов и личинок (Yu et al., 2019). Молекулярные механизмы негативного влияния ртути включают несколько регуляторных путей, затрагивающих энергетический обмен, окислительный стресс, апоптоз, иммунный ответ и метаболизм липидов (Немова, 2005; Morcillo et al., 2017; Olsvik et al., 2021; Wang et al., 2011; Yadetie et al., 2013 и др.). Ртуть нарушает внутриклеточный метаболизм  $Ca^{2+}$ , вызывая увеличение концентрации кальция в цитозоле клеток (Seccatelli et al., 2010). Благодаря своей способности связываться с тиоловыми группами белков, метилртуть может вызывать нарушение конформации структурных и регуляторных белков и инактивацию ферментных систем, проницаемость клеточных мембран (Немова, 2005; Seccatelli et al., 2010; Farina et al., 2011).

Рыба является основным, если не единственным, источником поступления метилртути в человеческий организм (Toxicological effects of methylmercury, 2000). Основные неблагоприятные последствия воздействия соединений ртути, включая метилртуть, на здоровье человека включают риск сердечно-сосудистых заболеваний, нейротоксичность, тератогенность, нефротоксичность, иммунотоксичность (Шувалова и др., 2021; Counter, 2002; Farina et al., 2011; Houston, 2011; Ivanova et al., 2021; Ratcliffe et al., 1996; Sweet and Zelikoff, 2001; Virtanen et al., 2007 и др.). В регионах, имеющих крупные водоемы, где немалая часть населения употребляет в пищу рыбу из них, следует принимать меры по разработке нормативов потребления рыбы (например, Иванова и др., 2020; Łuczyńska et al., 2017).

Разнообразная физиологическая роль тканевых и сывороточных белков, а также их способность реагировать на изменения интенсивности и направленности обменных процессов, в частности, пластического обмена, позволяют использовать их в качестве важнейшего биохимического показателя функционального состояния организма как в норме, так и при воздействии токсических веществ (Chernecky and Berger, 2008). Концентрация общего сывороточного белка является существенным интегральным показателем белкового обмена, его направленности и интенсивности.

Чрезвычайно важную роль выполняют в организме холестерин и его переносчики – липопротеины высокой и низкой плотности. Известно, что интоксикация ртутью у человека среди прочего сопровождается возникновением сердечно-сосудистых заболеваний: гипертонии, ишемической

болезни сердца, инфаркта миокарда, сердечных аритмий, что обусловлено снижением антиоксидантной защиты и усилением окислительного стресса (Houston, 2011). Выявлена положительная корреляционная связь между содержанием ртути в волосах людей, употреблявших рыбу с повышенным содержанием ртути в тканях, и уровнем общего холестерина, триглицеридов и липопротеинов низкой плотности в крови (Шувалова и др., 2021; Cho, 2017). Липопротеины высокой плотности (ЛПВП) и их основной белковый компонент аполипопротеин А1 (Апо А1) играют защитную роль, предотвращая развитие атеросклероза и сопутствующих заболеваний, поскольку участвуют в обратном транспорте холестерина (Annema and von Eckardstein, 2016; Jomard and Osto, 2019; Verdier et al., 2013 и др.).

В связи с этим представляется актуальной оценка биохимических изменений, происходящих в организме рыб в ответ на хроническое воздействие малых доз ртути. Цель настоящей работы – исследование эффектов ртути, поступающей с кормом, на содержание общего водорастворимого белка, липопротеинов высокой плотности и общего холестерина в сыворотке крови серебряного карася.

## Материалы и методы

Работа выполнена в июле–октябре 2021 г. на серебряных карасях *Carassius auratus* (Linnaeus, 1758), отловленных в Барском пруду пос. Борок (Некоузский р-н Ярославской области). Возраст рыб 2+...3+, средняя масса  $9.8 \pm 1.8$  г, средняя длина  $10.6 \pm 0.3$  см. Перед началом эксперимента формировали 4 группы рыб из 16 особей, две из которых впоследствии потребляли корм с повышенным содержанием ртути («ВР») и две – с пониженным («НР»). Каждую группу рыб помещали в 300-литровый проточный аквариум. Температура воды  $+20...+22$  °С, режим освещения естественный. Кормление рыб кормом с ртутью начато на следующий день после их поимки. Эксперимент продолжался в течение трех месяцев с момента начала кормления рыб.

Караси всех групп получали корм один раз в сутки в количестве 5% от массы тела с чередованием рыбного фарша и его желированной формы, включавшей, помимо рыбного фарша, комбикорм «TetraPondSticks». Фарш и желированный корм были приготовлены в достаточном объеме на весь срок эксперимента, заморожены при  $-20$  °С порционно (в объеме дневной нормы для одной группы рыб) и размораживались в день кормления. Перед замораживанием корма обоих видов в нем измерялось содержание ртути в трех повторностях. Рыбный фарш для кормления группы «ВР» был приготовлен из мышц окуней (выловленных в Волжском плесе Рыбинского водохранилища; содержание ртути в готовом фарше 0.143 мг/кг), для группы «НР» – из мышц минтая (коммерческий продукт; содержание ртути в готовом фарше 0.019 мг/кг). В желированном корме содержание ртути составляло 0.075 и 0.004 мг/кг для групп «ВР» и «НР» соответственно. Согласно рекомендациям Европейской комиссии<sup>1</sup>, содержание ртути в корме рыб не должно превышать концентрации 0.1 мг/кг. Таким образом, содержание ртути в корме группы «ВР» можно считать повышенным, а группы «НР» – пониженным.

Перед началом отбора проб рыб измеряли, взвешивали, определяли стадию зрелости половых продуктов (Сакун и Буцкая, 1968). Отбор сыворотки крови и мышц у карасей для определения содержания в них ртути производили до эксперимента («нулевая точка») и далее через 1, 2 и 3 месяца после начала кормления. Кусочки белых мышц (1–2 г) вырезали с двух сторон туловища рыбы под спинным плавником, замораживали и хранили при  $-18$  °С. Кровь отбирали после каудозектомии из хвостового сосуда в пробирки типа Эппендорф, отстаивали ее при 4 °С до образования сгустка в течение 1–2 часов. Отделившуюся сыворотку отбирали дозатором в пробирки и замораживали при  $-18$  °С. Общее количество белка в сыворотке крови определяли микробиуретовым методом (Itzhaki and Gill, 1964). Концентрацию общего холестерина (ОХ) и липопротеинов высокой плотности (ЛПВП) в сыворотке крови определяли с помощью биохимических наборов (производство «Ольвекс», Санкт-Петербург) энзиматическим колориметрическим методом (Fishbach and Dunning, 2004).

Определение содержания ртути в пробах мышц рыб производили на атомно-адсорбционном спектрометре РА915М с пиролитической приставкой ПИРО (Lumex, Санкт-Петербург).

Статистическая обработка данных произведена с помощью программы Statistica 6.0. Данные на графиках представлены в виде средних и их стандартного отклонения. Проверку на нормаль-

<sup>1</sup> Commission Directive 2003/100/EC of 31 October 2003. Amending Annex I to Directive 2002/32/EC of the European Parliament and of the Council on Undesirable Substances in Animal Feed. Official Journal of the European Union L285/33.

ность распределения данных проводили с помощью теста Шапиро–Уилка. Поскольку изучаемые выборки данных не подчинялись нормальному распределению, значения концентрации ртути и биохимических параметров сыворотки крови были логарифмически трансформированы; на основе полученных значений устанавливалась регрессионная зависимость биохимических параметров от концентрации ртути в мышцах рыб.

Однофакторный дисперсионный анализ использовали для установления влияния накопленной ртути на показатели белкового и липидного обмена у рыб в зависимости от продолжительности эксперимента. Достоверность различий между группами «НР» и «ВР» рассчитана по непараметрическому критерию Манна–Уитни для двух независимых групп. Различия во всех используемых тестах считали статистически достоверными при  $p < 0.05$ .

## Результаты

В ходе эксперимента наблюдалось возрастание содержания ртути в мышцах карасей, значительно более выраженное в группе «ВР» (Рис. 1). Концентрация ртути в этой группе по сравнению с нулевой точкой через 1, 2 и 3 месяца возросла соответственно в 5.8, 10.4 и 11.7 раза ( $F = 120.5$ ;  $n = 3$ ;  $p = 0.000001$ ); в группе «НР» увеличение составило 1.4, 3.2 и 3.2 раза ( $F = 82.6$ ;  $n = 3$ ;  $p = 0.0000001$ ). Концентрация ртути в мышцах рыб группы «ВР» была достоверно выше, чем в группе «НР», во все интервалы эксперимента: в 4 раза – через 1 месяц эксперимента ( $p = 0.0002$ ), в 3.3 раза – через 2 месяца ( $p = 0.002$ ), в 3.6 раза – через 3 месяца ( $p = 0.003$ ).

Наблюдалось достоверное увеличение содержания общего белка в сыворотке крови рыб по сравнению с таковым у интактных особей: в группе «ВР» – в 1.9, 2.0 и 2.3 раза ( $F = 27.0$ ;  $n = 3$ ;  $p = 0.0000001$ ), в группе «НР» – в 1.9, 2.0 и 2.0 раза ( $F = 27.0$ ;  $n = 3$ ;  $p = 0.0000001$ ) через 1, 2 и 3 месяца соответственно. Таким образом, значения показателя в группах «ВР» и «НР» не различались в течение первых двух месяцев; увеличение содержания общего белка в сыворотке крови рыб

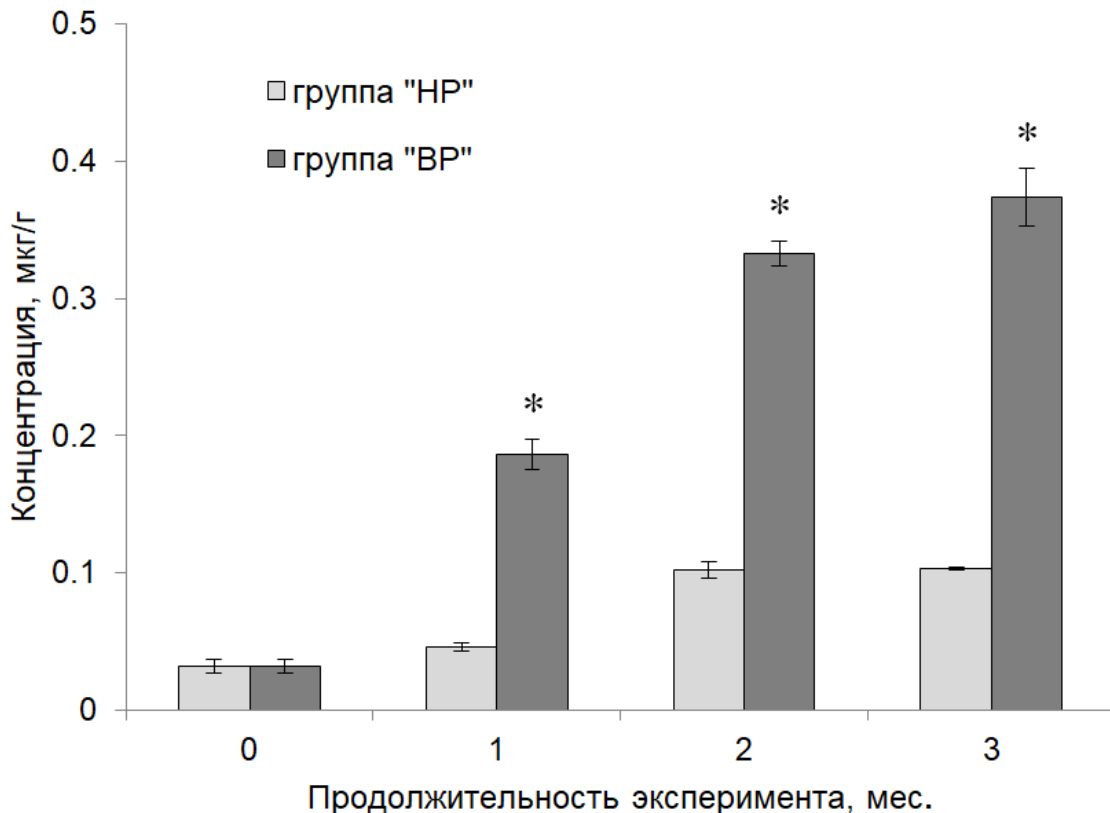


Рис. 1. Динамика накопления ртути в мышцах карасей. Здесь и далее: \* – достоверные отличия группы «ВР» от «НР» (критерий Манна–Уитни,  $p < 0.05$ ).

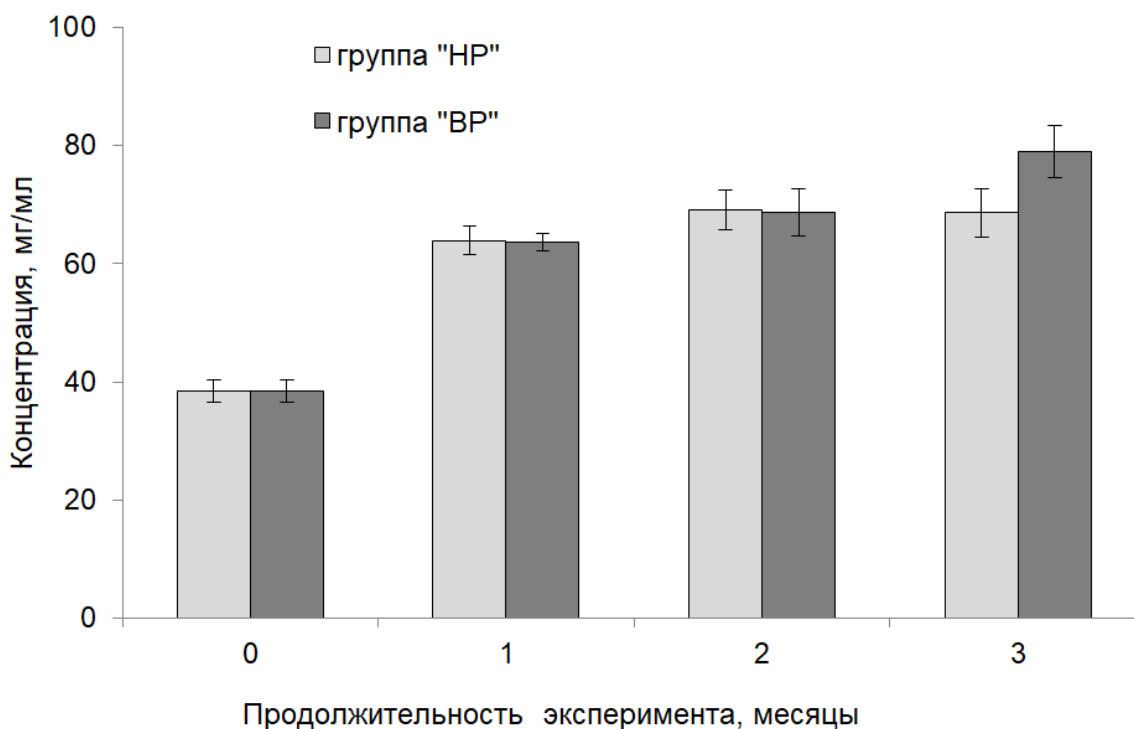


Рис. 2. Концентрация общего водорастворимого белка в сыворотке крови карасей.

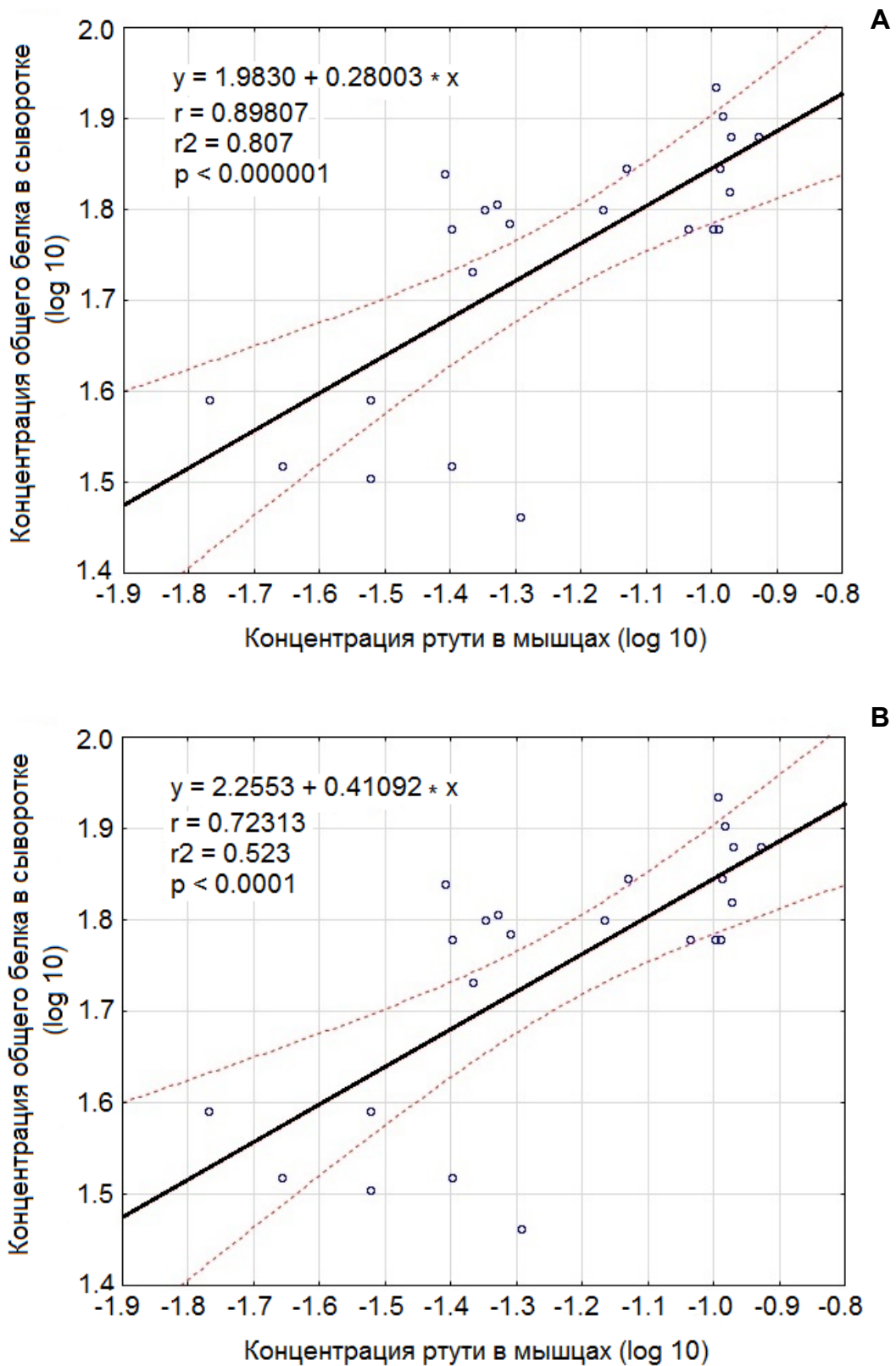
группы «BP» по сравнению с группой «HP» было отмечено лишь через три месяца эксперимента ( $p = 0.11$ ) (Рис. 2).

Возрастание концентрации белка в сыворотке крови обеих групп рыб можно было бы связать с потреблением карасями более калорийного корма, чем в их естественной среде обитания, о чем свидетельствует достоверное возрастание индекса упитанности по Фультону в течение эксперимента ( $F = 43.4$ ;  $n = 3$ ;  $p = 0.000001$  – в группе «BP»;  $F = 31.5$ ;  $n = 3$ ;  $p = 0.000001$  – в группе «HP») (Табл. 1), а также наличие выраженного слоя жира вокруг кишечника рыб в конце эксперимента. Однако регрессионный анализ показал наличие достоверной положительной связи между концентрацией белка в сыворотке и содержанием ртути в мышцах рыб как в группе «BP» (Рис. 3А), так и в группе «HP» (Рис. 3В).

Содержание общего холестерина в сыворотке крови карасей обеих групп на протяжении эксперимента значительно возросло по сравнению с начальными значениями: в 1.5, 2.2 и 3.1 раза в группе «BP» ( $F = 41.3$ ;  $n = 3$ ;  $p = 0.000001$ ), в 1.1, 1.8 и 1.9 раза в группе «HP» ( $F = 7.8$ ;  $n = 3$ ;  $p = 0.002$ ) через 1, 2 и 3 месяца соответственно (Рис. 4). При этом через 1 и 2 месяца эксперимента отличия между значениями показателей в группах «BP» и «HP» были недостоверны ( $p = 0.09$  и  $p =$

Табл. 1. Коэффициент упитанности рыб по Фультону.

Группа	Продолжительность эксперимента			
	до опыта	1 мес.	2 мес.	3 мес.
«HP»	$2.62 \pm 0.07$	$2.82 \pm 0.03$	$3.42 \pm 0.08$	$3.39 \pm 0.06$
«BP»	$2.73 \pm 0.05$	$2.94 \pm 0.04$	$3.16 \pm 0.07$	$3.63 \pm 0.09$



**Рис. 3.** Регрессионный анализ зависимости содержания общего белка в сыворотке крови карасей от концентрации ртути в мышцах в группе «BP» (A) и в группе «HP» (B).

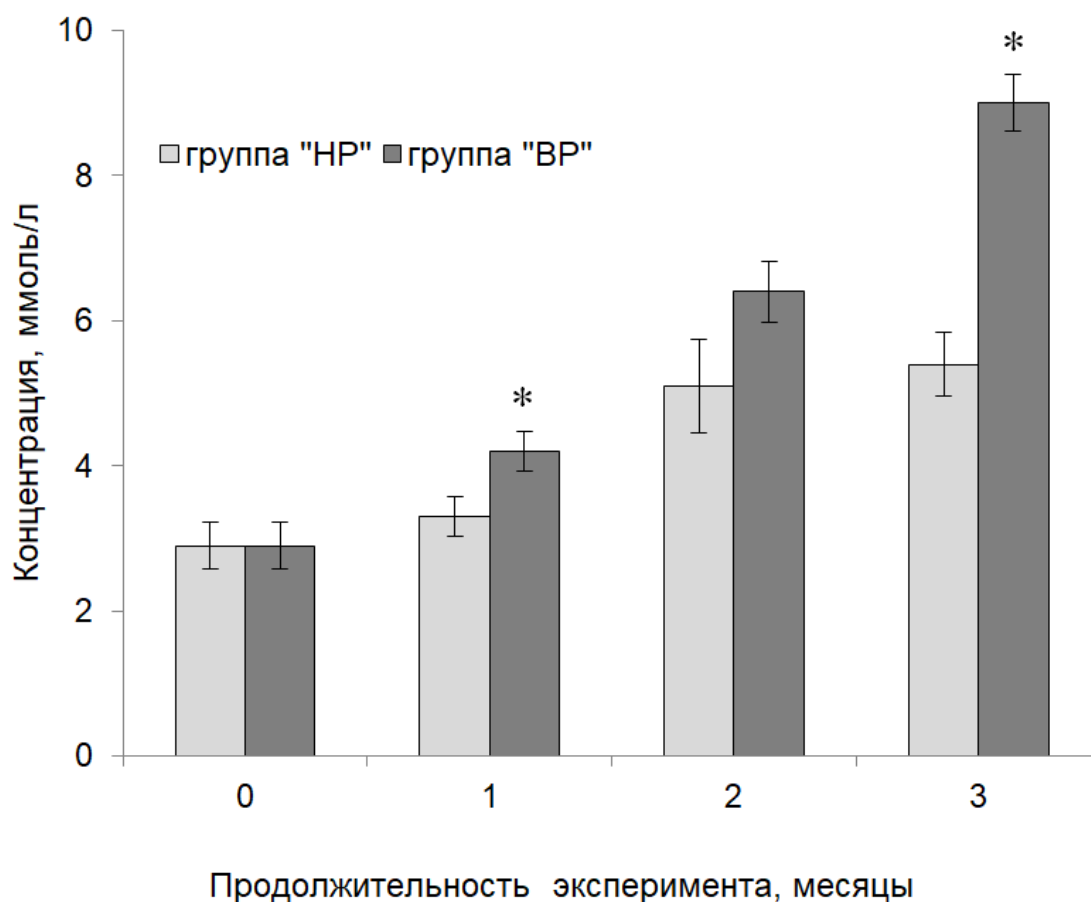


Рис. 4. Концентрация общего холестерина в сыворотке крови карасей.

0.33 соответственно), а через 3 месяца показатель в группе «BP» достоверно превышал таковой для группы «HP» в 1.7 раза ( $p = 0.01$ ).

Регрессионный анализ показал наличие достоверной положительной связи между концентрацией общего холестерина в сыворотке и содержанием ртути в мышцах рыб, более сильной в случае группы «BP» (Рис. 5).

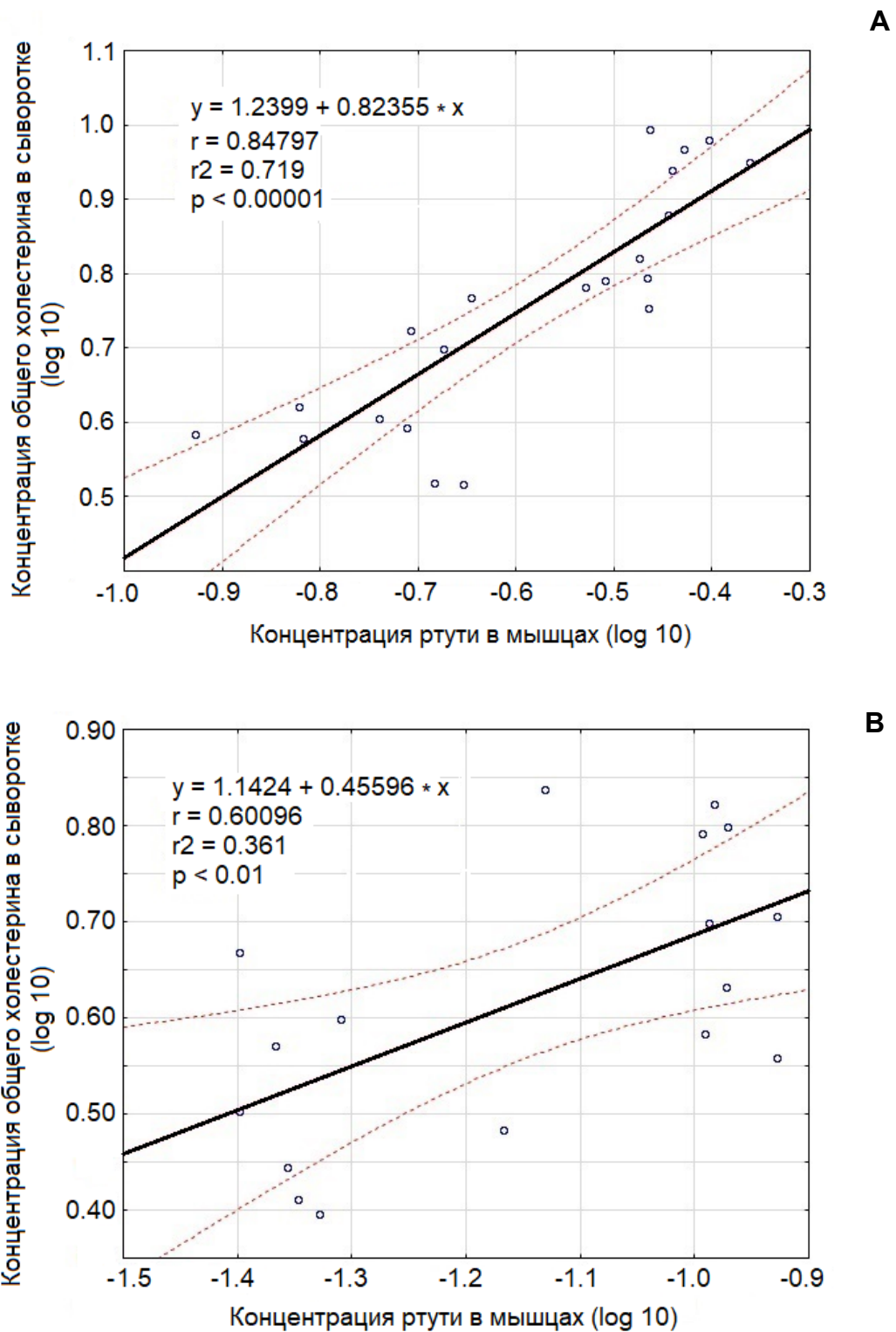
Изменение содержания ЛПВП в сыворотке крови на протяжении эксперимента носило более сложный, чем в случае общего холестерина и общего белка, характер (Рис. 6). В группе «BP» показатель снизился на 8% через 1 месяц, возрос в 2.0 и 1.9 раза ( $F = 21.4$ ,  $n = 3$ ,  $p = 0.000001$ ) через 2 и 3 месяца эксперимента соответственно по сравнению с интактными особями. В группе «HP» концентрация ЛПВП снизилась на 16% через 1 месяц, возросла в 1.4 раза и на 4% ( $F = 6.75$ ,  $n = 3$ ,  $p = 0.003$ ) – через 2 и 3 месяца эксперимента соответственно. Через 3 месяца показатель в группе «BP» был достоверно выше такового в группе «HP» в 1.8 раза ( $p = 0.01$ ).

Регрессионный анализ показал наличие положительной достоверной связи между концентрацией ЛПВП в сыворотке крови и содержанием ртути в мышцах карасей, более сильной у рыб группы «BP» (Рис. 7).

### Обсуждение результатов

Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что выбранная нами схема кормления рыб приводила к высокой скорости аккумуляции ртути в организме карасей. Так, употребление атлантической треской *Gadus morhua* (Linnaeus, 1758) корма, содержащего метилртуть в концентрации





**Рис. 5.** Регрессионный анализ зависимости содержания общего холестерина в сыворотке крови карасей от концентрации ртути в мышцах в группе «BP» (A) и в группе «HP» (B).

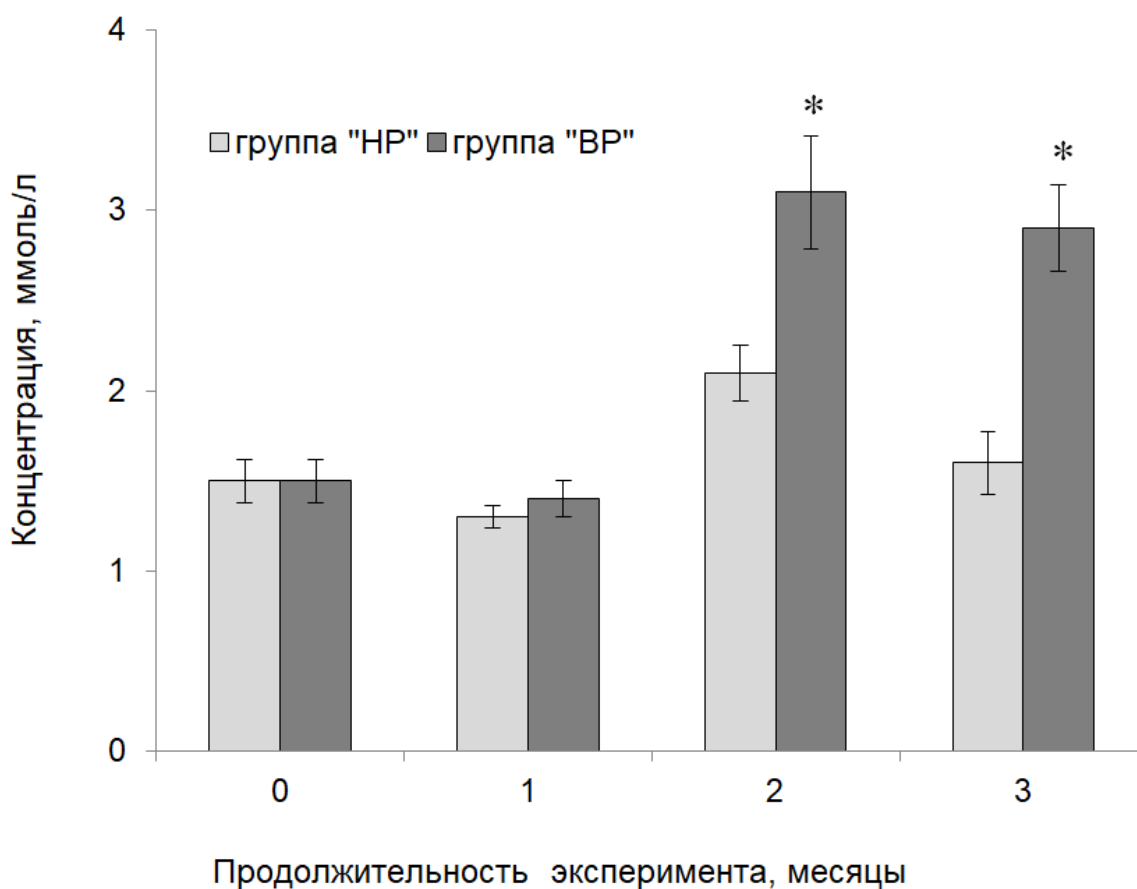
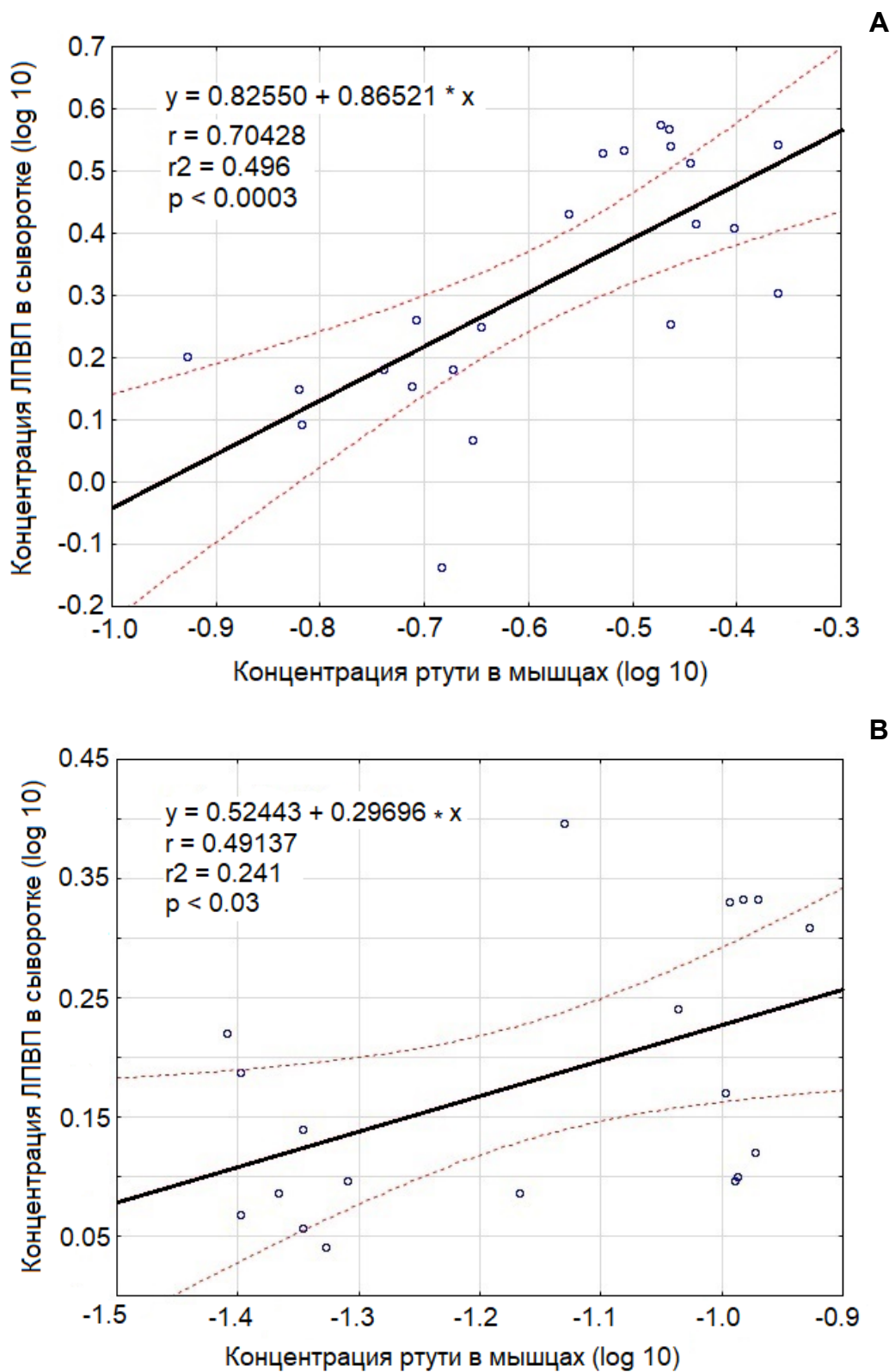


Рис. 6. Концентрация липопротеинов высокой плотности в сыворотке крови карасей.

0.95 мкг/г в течение трех месяцев приводило к возрастанию содержания ртути в мышцах рыб до  $0.38 \pm 0.04$  мкг/г сырой массы, из которых на долю метилртути приходилось 90–95% (Amlund et al., 2007). В нашем исследовании употребление карасями корма, содержащего в 6.6 раз меньше ртути (максимальная концентрация, в группе «BP»), чем в упомянутой работе, приводило к возрастанию концентрации ртути за тот же срок в мышечной ткани до того же уровня. Очевидно, это можно объяснить влиянием ряда факторов (режим кормления, условия содержания рыб, а также, возможно, физиологическими особенностями видов), которые повлияли на скорость аккумуляции токсиканта в тканях рыб.

Полученные результаты также свидетельствуют об изменениях в белковом и липидном обмене в организме рыб под воздействием ртути, содержащейся в корме. Степень выраженности этих изменений зависит от концентрации ртути и длительности ее воздействия. Среди изученных нами параметров белкового и липидного метаболизма в наибольшей степени увеличивалось содержание общего холестерина в сыворотке крови карасей: через 3 месяца после начала эксперимента его уровень вырос в 3.1 и 1.9 раза по сравнению с начальными значениями в группах, потреблявших корм с высоким и низким содержанием ртути соответственно. Содержание общего водорастворимого белка в сыворотке крови рыб возрастало в меньшей степени: в 2.3 и 2 раза по сравнению с начальными значениями в группах «BP» и «HP» соответственно, причем для этого показателя в группе «BP» выявлена наиболее сильная и достоверная связь с концентрацией накопленной ртути в мышцах. Наконец, в наименьшей степени увеличилось содержание липопротеинов высокой плотности в сыворотке крови рыб: в 2 и 1.4 раза в группах «BP» и «HP» соответственно, причем максимальное увеличение наблюдается через два месяца эксперимента, а затем наблюдается снижение показателя в обеих группах. Для этого показателя установлена наименьшая связь с концентрацией накопленной ртути в мышцах по сравнению с другими исследованными параметрами крови.



**Рис. 7.** Регрессионный анализ зависимости содержания липопротеинов высокой плотности в сыворотке крови карасей от концентрации ртути в мышцах в группе «BP»(A) и в группе «HP» (B).

Согласно литературным данным (Amlund et al., 2007), диета с высоким содержанием ртути приводила к увеличению концентрации ртути в крови рыб в 9 раз через 3 месяца эксперимента. В крови ртуть циркулирует в виде комплексов с аминокислотами и жирными кислотами; 80–90% поступившей в кровяное русло ртути связывается с эритроцитами (Лужников, 1994). Отмечено негативное влияние ртути на состав клеточных элементов крови: уменьшение количества эритроцитов, лейкоцитов, соотношения отдельных форм лейкоцитов, снижение содержания гемоглобина (Кузубова и др., 2000; Fletcher and White, 1986; Patil and Jabde, 1998). Нами не обнаружено сведений в доступной литературе относительно влияния ртути на сывороточный белок и липиды, содержащиеся в крови рыб в виде комплексов с белками (липопротеинов). Однако известно, что ртуть негативно влияет на ряд других показателей липидного обмена у рыб: у окуней с различным уровнем накопления ртути в тканях обнаружено повышение уровня триацилглицеринов в печени, изменение концентрации отдельных жирных кислот в липидах мышц и соотношений некоторых фосфолипидов в тканях и органах, увеличение содержания общих липидов в мышцах (Немова, 2005) и др. Сходное повышение уровня липидов в мышечной ткани отмечено также у индийских сомов (Pal and Ghosh, 2013). Наиболее существенные структурно-функциональные изменения в мембранах печени и мышц связаны с содержанием докозагексаеновой кислоты: снижение ее концентрации может изменять мембранную проницаемость и транспортные свойства, целостность мембраны, активность мембраносвязанных ферментов и экспрессию рецепторов. В печени такое изменение профиля жирных кислот влечет за собой нарушение ее функций (Немова, 2005). В совокупности эти факты свидетельствуют о важности показателей липидного обмена в оценке негативного воздействия ртути на организм гидробионтов.

Возрастание под воздействием ртути концентрации общего белка в сыворотке крови рыб в нашем исследовании на первый взгляд находится в некотором противоречии с данными литературы. В частности, установлено, что двухвалентная ртуть обладает сродством к нуклеиновым кислотам, особенно к РНК, включаясь в структуру ее молекулы и тем самым негативно влияя на синтез ДНК. Снижение количества ДНК и РНК в клетке неизбежно приводит к подавлению синтеза белка (Кузубова, 2000), следовательно, маловероятно, что возрастание содержания общего сывороточного белка вызвано усилением его биосинтеза в печени рыб. Известно, однако, что синтез отдельных белков, выполняющих защитную функцию (металлотионеинов) индуцируется, а не подавляется тяжелыми металлами, в том числе ртутью (Bebianno et al., 2007; Farina et al., 2011; Morcillo et al., 2017). Можно предположить, что причиной увеличения концентрации белка в сыворотке явилась ее дегидратация вследствие перераспределения белка между тканями и кровью и выхода жидкости из сосудистого пространства в ткани. Известно, что распределение белка плазмы между внутри- и внесосудистой жидкостями организма рыб зависит от физиологического состояния организма рыб, в частности, периода годового цикла (нерест, завершение нагула) (Andreeva et al., 2015). Не исключено, что ртуть также может оказывать влияние на данный процесс, взаимодействуя с SH-содержащими белками, входящими в структуры клеточных мембран, вызывая свободнорадикальное и перекисное окисление липидов мембран, что приводит к нарушению их гидрофобности и, как следствие, проницаемости.

## Выводы

1. В ходе эксперимента установлено значительное накопление ртути в мышцах карасей, зависящее от количества ртути в корме и продолжительности кормления.
2. Выявлены изменения в показателях белкового обмена: увеличение уровня общего белка в сыворотке крови рыб, что, по-видимому, обусловлено дегидратацией сыворотки вследствие перераспределения белка между тканями и кровью и выходом жидкости из сосудистого пространства в ткани.
3. Обнаружены изменения в показателях липидного обмена: увеличение уровня общего холестерина (в наибольшей степени) и липопротеинов высокой плотности в сыворотке крови рыб.
4. Исследованные биохимические параметры крови положительно коррелируют с содержанием ртути в мышцах рыб и могут быть использованы для оценки негативного влияния токсиканта на организм рыб.

## Список литературы

Иванова, Е.С., Комов, В.Т., Ельцова, Л.С., Борисов, М.Я., Тропин, Н.Я., 2020. Содержание ртути в рыбе из водоемов и водотоков Вологодской области и расчет безопасных для здоровья

доз металла в рационе питания взрослых и детей. *Сборник материалов VII Всероссийской конференции по водной экотоксикологии, посвященной памяти д.б.н., проф. Б.А. Флёрова «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы. Современные методы исследования и оценки качества вод, состояния водных организмов и экосистем в условиях антропогенной нагрузки».* Борок, 16–18 сентября 2020 г. Филигрань, Ярославль, Россия, 77–80.

Кузубова, Л.И., Шуваева, О.В., Аношин, Г.Н., 2000. Метилртуть в окружающей среде (распространение, образование в природе, методы определения). Аналитический обзор. Институт неорганической химии. Аналитический центр Объединенного института геологии, географии и минералогии СО РАН (Экология. Вып. 59). ГПНТБ СО РАН, Новосибирск, Россия, 82 с.

Лужников, Е.А., 1994. Клиническая токсикология. Медицина, Москва, Россия, 256 с.

Немова, Н.Н., 2005. Биохимические эффекты накопления ртути у рыб. Наука, Москва, Россия, 164 с.

Сакун, О.Ф., Буцкая, Н.А., 1968. Определение стадий зрелости и изучение половых циклов рыб. ПИНРО, Мурманск, Россия, 47 с.

Шувалова, О.П., Иванова, Е.С., Комов, В.Т., 2021. Потребление рыбы, содержание ртути в волосах и риск развития сердечно-сосудистых заболеваний у жителей Вологодской области (северо-запад России). *Вестник новых медицинских технологий* **15** (4), 132–137. <http://www.doi.org/10.24412/2075-4094-2021-4-3-9>

Amlund, H., Lundebye, A.-K., Berntssen, M.H.G., 2007. Accumulation and elimination of methylmercury in Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) following dietary exposure. *Aquatic Toxicology* **83** (4), 323–330. <http://www.doi.org/10.1016/j.aquatox.2007.05.008>

Andreeva, A.M., Lamash, N.E., Serebryakova, M.V., Ryabtseva, I.P., 2015. Seasonal dynamics in capillary filtration of plasma proteins in eastern redfins of the genus *Tribolodon* (Cyprinidae). *Journal of Ichthyology* **55**, 723–733. <https://doi.org/10.1134/S003294521505001X>

Annema, W., von Eckardstein, A., 2016. Dysfunctional high-density lipoproteins in coronary heart disease: implications for diagnostics and therapy. *Translational Research* **173**, 30–57. <http://www.doi.org/10.1016/j.trsl.2016.02.008>

Batchelar, K.L., Kidd, K.A., Drevnick, P.E., Munkittrick, K.R., Burgess, N.M., Roberts, A.P., Smith, J.D., 2013. Evidence of impaired health in yellow perch (*Perca flavescens*) from a biological mercury hotspot in northeastern North America. *Environmental Toxicology and Chemistry* **32** (3), 627–637. <https://doi.org/10.1002/etc.2099>

Bebiano, M.J., Santos, C., Canário, J., Gouveia, N., Sena-Carvalho, D., Vale, C., 2007. Hg and metallothionein-like proteins in the black scabbard fish *Aphanopus carbo*. *Food and Chemical Toxicology* **45**, 1443–1452. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2007.02.003>

Berntssen, M.H.G., Aatland, A., Handy, R.D., 2003. Chronic dietary mercury exposure causes oxidative stress, brain lesions, and altered behaviour in Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr. *Aquatic Toxicology* **65**, 55–72. [https://doi.org/10.1016/s0166-445x\(03\)00104-8](https://doi.org/10.1016/s0166-445x(03)00104-8)

Bloom, N.S., 1992. On the chemical form of mercury in edible fish and marine invertebrate tissue. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **49**, 1010–1017. <https://doi.org/10.1139/f92-113>

Carrasco, L., Barata, C., García-Berthou, E., Tobias, A., Bayona, J.M., Díez, S., 2011. Patterns of mercury and methylmercury bioaccumulation in fish species downstream of a long-term mercury-contaminated site in the lower Ebro River (NE Spain). *Chemosphere* **84**, 1642–1649. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.022>

- Ceccatelli, S., Dare, E., Moors, M., 2010. Methylmercury-induced neurotoxicity and apoptosis. *Chemico-Biological Interactions* **188** (2), 301–308. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2010.04.007>
- Chernecky, C.C., Berger, B.J., 2008. Laboratory tests and diagnostic procedures. Saunder Elsevier, California, USA, 1215 p.
- Cho, Y.M., 2017. Fish consumption, mercury exposure, and the risk of cholesterol profiles: findings from the Korea National Health and Nutrition Examination Survey 2010–2011. *Environmental Health and Toxicology* **32**, e2017014. <https://doi.org/10.5620/eh.t.e2017014>
- Clarkson, T.W., 2002. The three modern faces of mercury. *Environmental Health Perspectives* **110** (Suppl. 1), 11–23. <https://doi.org/10.1289/ehp.02110s111>
- Counter, S.A., Buchanan, L.H., Ortega, F., Laurell, G., 2002. Elevated blood mercury and neuro-otological observations in children of the Ecuadorian gold mines. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A* **60**, 149–163. <https://doi.org/10.1080/152873902753396785>
- Erickson, R.J., Nichols, J.W., Cook, P.M., Ankley, G.T., 2008. Bioavailability of chemical contaminants in aquatic systems, In: Di Giulio, R.T., Hinton, D.E. (eds.), *Technology of Fishes*. CRC Press, Florida, USA, 9–45.
- Farina, M., Aschner, M., Rocha, J.B., 2011. Oxidative stress in MeHg-induced neurotoxicity. *Toxicology and Applied Pharmacology* **256** (3), 405–417. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2011.05.001>
- Fishbach, F., Dunning, M., 2004. A manual of laboratory diagnostic tests. 7<sup>th</sup> ed. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, USA, 1291 p.
- Fitzgerald, W.F., Engstrom, D.R., Mason, R.P., Nater, E.A., 1998. The case for atmospheric mercury contamination in remote areas. *Environmental Science and Technology* **32** (1), 1–7.
- Fletcher, T.C., White, A., 1986. Nephrotoxic and hematological effects of mercury chloride in the plaice (*Pleuronectes platessa* L.). *Aquatic Toxicology* **8**, 77–84.
- Gilmour, C.C., Henry, E.A., Mitchell, R., 1992. Sulfate stimulation of mercury methylation in freshwater sediments. *Environmental Science and Technology* **26**, 2281–2287. <https://doi.org/10.1021/es00035a029>
- Houston, M.C., 2011. Role of mercury toxicity in hypertension, cardiovascular disease, and stroke. *The Journal of Clinical Hypertension* **13** (8), 621–627. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7176.2011.00489.x>
- Itzhaki, R.F., Gill, D.M., 1964. A micro-biuret method for estimating proteins. *Analytical Biochemistry* **9** (4), 401–410. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(64\)90200-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(64)90200-3)
- Ivanova, E.S., Shuvalova, O.P., Eltsova, L.S., Komov, V.T., Kornilova, A.I., 2021. Cardiometabolic risk factors and mercury content in hair of women from a territory distant from mercury-rich geochemical zones (Cherepovets city, Northwest Russia). *Environmental Geochemistry and Health* **43**, 4589–4599. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00939-6>
- Jomard, A., Osto, E. Metabolismus und Funktion der Lipoproteinehoher Dichte (HDL), 2019. *Praxis* **108** (7), 477–486. <https://doi.org/10.1024/1661-8157/a003241>
- Klaper, R., Carter, B.J., Richter, C.A., Drevnick, P.E., Sandheinrich, M.B., Tillitt, D.E., 2008. Use of a 15 k gene microarray to determine gene expression changes in response to acute and chronic methylmercury exposure in the fathead minnow *Pimephales promelas* Rafinesque. *Journal of Fish Biology* **72** (9), 2207–2280. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2008.01899.x>

- Łuczynańska, J., Paszczyk, B., Nowosad, J., Luczynski, M.J., 2017. Mercury, fatty acids content and lipid quality indexes in muscles of freshwater and marine fish on the Polish market. Risk assessment of fish consumption. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **14** (10), 1120. <https://doi.org/10.3390/ijerph14101120>
- Monteiro, D.A., Thomaz, J.M., Rantin, F.T., Kalinin, A.L., 2013. Cardiorespiratory responses to graded hypoxia in the neotropical fish matrinxã (*Brycon amazonicus*) and traíra (*Hopliasoma labaricus*) after waterborne or trophic exposure to inorganic mercury. *Aquatic Toxicology* **140–141**, 346–355. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2013.06.011>
- Morcillo, P., Esteban, M.A., Cuesta, A., 2017. Mercury and its toxic effects on fish. *Environmental Science* **4** (3), 386–402. <https://doi.org/10.3934/environsci.2017.3.386>
- Toxicological effects of methylmercury, 2000. National Research Council. The National Academies Press, Washington, USA, 364 p. <https://doi.org/10.17226/9899>
- Olsvik, P.A., Azad, A.M., Yadetie, F., 2021. Bioaccumulation of mercury and transcriptional responses in tusk (*Brosme brosme*), a deep-water fish from a Norwegian fjord. *Chemosphere* **279**, 130588. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130588>
- Pal, M., Ghosh, M., 2013. Relationship of methyl mercury accumulation with lipid and weight in two river cat fish species, *Wallago attu* and *Mystus aor*, from West Bengal, India. *Environmental Monitoring and Assessment* **185**, 31–37. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2530-3>
- Patil, S.S., Jabde, S.V., 1998. Effect of mercury poisoning on some haematological parameters from a fresh water fish, *Channa gachua*. *Pollution Research* **17** (3), 223–228.
- Ratcliffe, H.E., Swanson, G.M., Fischer, L.J., 1996. Human exposure to mercury: A critical assessment of the evidence of adverse health effects. *Journal of Toxicology and Environmental Health* **49**, 221–270. <https://doi.org/10.1080/00984108.1996.11667600>
- Schäfer, J., Castelle, S., Blanc, G., Dabrin, A., Masson, M., Lanceleur, L., Bossy, C., 2010. Mercury methylation in the sediments of macrotidal estuary (Gironde Estuary, south-west France) *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **90**, 80–92. <https://doi.org/10.1016/J.ECSS.2010.07.007>
- Sweet, L.I., Zelikoff, J.T., 2001. Toxicology and immunotoxicology of mercury: A comparative review in fish and humans. *Journal Toxicological Environment Health B* **4**, 161–205.
- Verdier, C., Martinez, L.O., Ferrières, J., Elbaz, M., Genoux, A., Perret, B., 2013. Targeting high-density lipoproteins: update on a promising therapy. *Archives of Cardiovascular Diseases* **106** (11), 601–611. <https://doi.org/10.1016/j.acvd.2013.06.052>
- Virtanen, J.K., Rissanen, T.H., Voutilainen, S., Tuomainen, T.P., 2007. Mercury as a risk factor for cardiovascular diseases. *The Journal of Nutritional Biochemistry* **18** (2), 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2006.05.001>
- Wang, M., Wang, Yu., Wang, J., Lin, L., Hong, H., Wang, D., 2011. Proteome profiles in medaka (*Oryzias melastigma*) liver and brain experimentally exposed to acute inorganic mercury. *Aquatic Toxicology* **103**, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2011.02.020>
- Yadetie, F., Karlsen, O.A., Lanzen, A., Berg, K., Olsvik, P., Hogstrand, C., Goksoyr, A., 2013. Global transcriptome analysis of Atlantic cod (*Gadus morhua*) liver after in vivo methylmercury exposure suggests effects on energy metabolism pathways. *Aquatic Toxicology* **126**, 314–325. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2012.09.013>

Yu, X., Wu, F., Xu, X., Chen, Q., Huang, L. et al., 2019. Effects of short term methylmercury exposure on growth and development of the large yellow croaker embryos and larvae. *Frontiers in Marine Science* **6**, 754. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00754>

Zhu, S., Zhang, Zh., Žagar, D., 2018. Mercury transport and fate models in aquatic systems: A review and synthesis. *Science of the Total Environment* **639**, 538–549. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.397>

## References

Amlund, H., Lundebye, A.-K., Berntssen, M.H.G., 2007. Accumulation and elimination of methylmercury in Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) following dietary exposure. *Aquatic Toxicology* **83** (4), 323–330. <http://www.doi.org/10.1016/j.aquatox.2007.05.008>

Andreeva, A.M., Lamash, N.E., Serebryakova, M.V., Ryabtseva, I.P., 2015. Seasonal dynamics in capillary filtration of plasma proteins in eastern redfins of the genus *Tribolodon* (Cyprinidae). *Journal of Ichthyology* **55**, 723–733. <https://doi.org/10.1134/S003294521505001X>

Annema, W., von Eckardstein, A., 2016. Dysfunctional high-density lipoproteins in coronary heart disease: implications for diagnostics and therapy. *Translational Research* **173**, 30–57. <http://www.doi.org/10.1016/j.trsl.2016.02.008>

Batchelar, K.L., Kidd, K.A., Drevnick, P.E., Munkittrick, K.R., Burgess, N.M., Roberts, A.P., Smith, J.D., 2013. Evidence of impaired health in yellow perch (*Perca flavescens*) from a biological mercury hotspot in northeastern North America. *Environmental Toxicology and Chemistry* **32** (3), 627–637. <https://doi.org/10.1002/etc.2099>

Bebiano, M.J., Santos, C., Canário, J., Gouveia, N., Sena-Carvalho, D., Vale, C., 2007. Hg and metallothionein-like proteins in the black scabbard fish *Aphanopus carbo*. *Food and Chemical Toxicology* **45**, 1443–1452. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2007.02.003>

Berntssen, M.H.G., Aatland, A., Handy, R.D., 2003. Chronic dietary mercury exposure causes oxidative stress, brain lesions, and altered behaviour in Atlantic salmon (*Salmo salar*) parr. *Aquatic Toxicology* **65**, 55–72. [https://doi.org/10.1016/s0166-445x\(03\)00104-8](https://doi.org/10.1016/s0166-445x(03)00104-8)

Bloom, N.S., 1992. On the chemical form of mercury in edible fish and marine invertebrate tissue. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **49**, 1010–1017. <https://doi.org/10.1139/f92-113>

Carrasco, L., Barata, C., García-Berthou, E., Tobias, A., Bayona, J.M., Díez, S., 2011. Patterns of mercury and methylmercury bioaccumulation in fish species downstream of a long-term mercury-contaminated site in the lower Ebro River (NE Spain). *Chemosphere* **84**, 1642–1649. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.05.022>

Ceccatelli, S., Dare, E., Moors, M., 2010. Methylmercury-induced neurotoxicity and apoptosis. *Chemico-Biological Interactions* **188** (2), 301–308. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2010.04.007>

Chernecky, C.C., Berger, B.J., 2008. Laboratory tests and diagnostic procedures. Saunderson Elsevier, California, USA, 1215 p.

Cho, Y.M., 2017. Fish consumption, mercury exposure, and the risk of cholesterol profiles: findings from the Korea National Health and Nutrition Examination Survey 2010–2011. *Environmental Health and Toxicology* **32**, e2017014. <https://doi.org/10.5620/eht.e2017014>

Clarkson, T.W., 2002. The three modern faces of mercury. *Environmental Health Perspectives* **110** (Suppl. 1), 11–23. <https://doi.org/10.1289/ehp.02110s111>



- Counter, S.A., Buchanan, L.H., Ortega, F., Laurell, G., 2002. Elevated blood mercury and neuro-otological observations in children of the Ecuadorian gold mines. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A* **60**, 149–163. <https://doi.org/10.1080/152873902753396785>
- Erickson, R.J., Nichols, J.W., Cook, P.M., Ankley, G.T., 2008. Bioavailability of chemical contaminants in aquatic systems, In: Di Giulio, R.T., Hinton, D.E. (eds.), *Technology of Fishes*. CRC Press, Florida, USA, 9–45.
- Farina, M., Aschner, M., Rocha, J.B., 2011. Oxidative stress in MeHg-induced neurotoxicity. *Toxicology and Applied Pharmacology* **256** (3), 405–417. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2011.05.001>
- Fishbach, F., Dunning, M., 2004. A manual of laboratory diagnostic tests. 7<sup>th</sup> ed. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, USA, 1291 p.
- Fitzgerald, W.F., Engstrom, D.R., Mason, R.P., Nater, E.A., 1998. The case for atmospheric mercury contamination in remote areas. *Environmental Science and Technology* **32** (1), 1–7.
- Fletcher, T.C., White, A., 1986. Nephrotoxic and hematological effects of mercury chloride in the plaice (*Pleuronectes platessa* L.). *Aquatic Toxicology* **8**, 77–84.
- Gilmour, C.C., Henry, E.A., Mitchell, R., 1992. Sulfate stimulation of mercury methylation in freshwater sediments. *Environmental Science and Technology* **26**, 2281–2287. <https://doi.org/10.1021/es00035a029>
- Houston, M.C., 2011. Role of mercury toxicity in hypertension, cardiovascular disease, and stroke. *The Journal of Clinical Hypertension* **13** (8), 621–627. <https://doi.org/10.1111/j.1751-7176.2011.00489.x>
- Itzhaki, R.F., Gill, D.M., 1964. A micro-biuret method for estimating proteins. *Analytical Biochemistry* **9** (4), 401–410. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(64\)90200-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(64)90200-3)
- Ivanova, E.S., Komov, V.T., Eltsova, L.S., Borisov, M.Y., Tropin, N.Y., 2020. Soderzhanie rtuti v rybe iz vodoyomov i vodotokov Vologodskoi oblasti i raschyot bezopasnykh dlya zdorov'ya doz metalla v ratsionne pitaniya vzroslykh i detei [The content of mercury in fish from reservoirs and streams of the Vologda Oblast and the calculation of safe for health doses of the metal in the diet of adults and children]. *Sbornik materialov VII Vserossiiskoi konferentsii po vodnoi ecotoxikologii, posvyashchyonnoi pamyati d.b.n., prof. B.A. Flyorova "Antropogennoye vliyanie na vodnyye organizmy i ecosystemy. Sovremennyye metody issledovaniya i otsenki kachestva vod, sostoyaniya vodnykh organismov i ecosystem v usloviyakh antropogennoi nagruzki"* [Proceedings of the VII All-Russian Conference on Aquatic Ecotoxicology, dedicated to the memory of Doctor of Biological Sciences, prof. B.A. Flyorov "Anthropogenic impact on aquatic organisms and ecosystems. Modern methods of research and assessment of water quality, the state of aquatic organisms and ecosystems under anthropogenic load"]. Borok, Russia, 77–80. (In Russian).
- Ivanova, E.S., Shuvalova, O.P., Eltsova, L.S., Komov, V.T., Kornilova, A.I., 2021. Cardiometabolic risk factors and mercury content in hair of women from a territory distant from mercury-rich geochemical zones (Cherepovets city, Northwest Russia). *Environmental Geochemistry and Health* **43**, 4589–4599. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00939-6>
- Jomard, A., Osto, E. Metabolismus und Funktion der Lipoproteinehoher Dichte (HDL), 2019. *Praxis* **108** (7), 477–486. <https://doi.org/10.1024/1661-8157/a003241>
- Klaper, R., Carter, B.J., Richter, C.A., Drevnick, P.E., Sandheinrich, M.B., Tillitt, D.E., 2008. Use of a 15 k gene microarray to determine gene expression changes in response to acute and chronic methylmercury exposure in the fathead minnow *Pimephales promelas* Rafinesque. *Journal of Fish Biology* **72** (9), 2207–2280. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2008.01899.x>

- Kuzubova, L.I., Shuvaeva, O.V., Anoshin, G.N., 2000. Metiltut' v okruzhayushchei srede (rasprostraneniye, obrazovaniye v prirode, metody opredeleniya). Analiticheskii obzor [Methylmercury in the environment (distribution, formation in nature, methods of determination). Analytical review]. Institute of Inorganic Chemistry. Analytical Center of the Joint Institute of Geology, Geography and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (*Ecologiya*. Issue 59). State Public Scientific and Technical Library of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia, 82 p. (In Russian).
- Łuczyńska, J., Paszczyk, B., Nowosad, J., Luczynski, M.J., 2017. Mercury, fatty acids content and lipid quality indexes in muscles of freshwater and marine fish on the Polish market. Risk assessment of fish consumption. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **14** (10), 1120. <https://doi.org/10.3390/ijerph14101120>
- Luzhnikov, E.A., 1994. Klinicheskaya toksikologiya [Clinical Toxicology]. Meditsina, Moscow, Russia, 256 p. (In Russian).
- Monteiro, D.A., Thomaz, J.M., Rantin, F.T., Kalinin, A.L., 2013. Cardiorespiratory responses to graded hypoxia in the neotropical fish matrinxã (*Brycon amazonicus*) and traíra (*Hopliasoma labaricus*) after waterborne or trophic exposure to inorganic mercury. *Aquatic Toxicology* **140–141**, 346–355. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2013.06.011>
- Morcillo, P., Esteban, M.A., Cuesta, A., 2017. Mercury and its toxic effects on fish. *Environmental Science* **4** (3), 386–402. <https://doi.org/10.3934/environsci.2017.3.386>
- Nemova, N.N., 2005. Biokhimicheskiye efekty nakopleniya rtuti u ryb [Biochemical effects of mercury accumulation in fish]. Nauka, Moscow, Russia, 164 p. (In Russian).
- Toxicological effects of methylmercury, 2000. National Research Council. The National Academies Press, Washington, USA, 364 p. <https://doi.org/10.17226/9899>
- Olsvik, P.A., Azad, A.M., Yadetie, F., 2021. Bioaccumulation of mercury and transcriptional responses in tusk (*Brosme brosme*), a deep-water fish from a Norwegian fjord. *Chemosphere* **279**, 130588. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130588>
- Pal, M., Ghosh, M., 2013. Relationship of methyl mercury accumulation with lipid and weight in two river cat fish species, *Wallago attu* and *Mystus aor*, from West Bengal, India. *Environmental Monitoring and Assessment* **185**, 31–37. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2530-3>
- Patil, S.S., Jabde, S.V., 1998. Effect of mercury poisoning on some haematological parameters from a fresh water fish, *Channa gachua*. *Pollution Research* **17** (3), 223–228.
- Ratcliffe, H.E., Swanson, G.M., Fischer, L.J., 1996. Human exposure to mercury: A critical assessment of the evidence of adverse health effects. *Journal of Toxicology and Environmental Health* **49**, 221–270. <https://doi.org/10.1080/00984108.1996.11667600>
- Sakun, O.F., Butskaya, N.A., 1968. Opredeleniye stadia zrelosti i izucheniye polovykh tsiklov ryb [Determining the maturity stages of maturity and studying the sexual cycles of fish]. Polar Branch of VNIRO (“PINRO”), Murmansk, Russia, 47 p. (In Russian).
- Schäfer, J., Castelle, S., Blanc, G., Dabrin, A., Masson, M., Lancelleur, L., Bossy, C., 2010. Mercury methylation in the sediments of a macrotidal estuary (Gironde Estuary, south-west France) *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **90**, 80–92. <https://doi.org/10.1016/J.ECSS.2010.07.007>
- Shuvalova, O.P., Ivanova, E.S., Komov, V.T., 2021. Potrebleniye ryby, sodержaniye rtuti v volosakh i risk razvitiya serdechno-sosudistykh zabolevaniy u zhitel'ey Vologodskoi oblasti (severo-zapad Rossii) [Fish consumption, mercury content in hair, and the risk of developing cardiovascular diseases in

residents of the Vologda Oblast (North-West Russia)]. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii [Bulletin of New Medical Technologies]* **15** (4), 132–137. (In Russian). <http://doi.org/10.24412/2075-4094-2021-4-3-9>

Sweet, L.I., Zelikoff, J.T., 2001. Toxicology and immunotoxicology of mercury: A comparative review in fish and humans. *Journal Toxicological Environment Health B* **4**, 161–205.

Verdier, C., Martinez, L.O., Ferrières, J., Elbaz, M., Genoux, A., Perret, B., 2013. Targeting high-density lipoproteins: update on a promising therapy. *Archives of Cardiovascular Diseases* **106** (11), 601–611. <https://doi.org/10.1016/j.acvd.2013.06.052>

Virtanen, J.K., Rissanen, T.H., Voutilainen, S., Tuomainen, T.P., 2007. Mercury as a risk factor for cardiovascular diseases. *The Journal of Nutritional Biochemistry* **18** (2), 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2006.05.001>

Wang, M., Wang, Yu., Wang, J., Lin, L., Hong, H., Wang, D., 2011. Proteome profiles in medaka (*Oryzias melastigma*) liver and brain experimentally exposed to acute inorganic mercury. *Aquatic Toxicology* **103**, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2011.02.020>

Yadatie, F., Karlsen, O.A., Lanzen, A., Berg, K., Olsvik, P., Hogstrand, C., Goksoyr, A., 2013. Global transcriptome analysis of Atlantic cod (*Gadus morhua*) liver after in vivo methylmercury exposure suggests effects on energy metabolism pathways. *Aquatic Toxicology* **126**, 314–325. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2012.09.013>

Yu, X., Wu, F., Xu, X., Chen, Q., Huang, L. et al., 2019. Effects of short term methylmercury exposure on growth and development of the large yellow croaker embryos and larvae. *Frontiers in Marine Science* **6**, 754. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00754>

Zhu, S., Zhang, Zh., Žagar, D., 2018. Mercury transport and fate models in aquatic systems: A review and synthesis. *Science of the Total Environment* **639**, 538–549. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.397>