

Биоаккумуляция, биотрансформация и биологические эффекты загрязняющих веществ

УДК 597.546.49(470.316)

КОНЦЕНТРАЦИИ РТУТИ В МЫШЦАХ РАЗНЫХ ВИДОВ РЫБ ИЗ ВОДОЕМОВ ЯРОСЛАВСКОЙ ОБЛАСТИ И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

В. А. Гремячих^{*}, Р. А. Ложкина^{**}, Д. Э. Котиков, В. Т. Комов

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

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

e-mail: ^{}grva@ibiw.ru, ^{**}Lozhkina.roza@yandex.ru*

Поступила в редакцию 16.09.2022

Ртуть (Hg) и ее соединения, представляющие риск для здоровья населения, не занятого на вредных производствах, поступают в организм человека преимущественно с продуктами питания. В первую очередь это морепродукты, рыба и рыбные консервы. В настоящем исследовании были определены концентрации Hg в мышцах представителей разных видов рыб из водоемов Ярославской области. Средние значения содержания ртути варьируют в интервале 0.03–0.41 мг/кг сырой массы. Зарегистрированные уровни накопления металла соответствуют или близки к ранее установленным величинам в мышцах рыб из пресноводных водоемов европейской части России и европейских государств. Отмечена видоспецифичность процесса накопления Hg, зависимость от трофической специализации и размерно-весовых характеристик рыб, типа водоема. Установленные в РФ нормативы по содержанию металла в мышцах мирных (<0.3 мг/кг сырой) и хищных видов рыб (<0.6 мг/кг) превышены у 0.3 и 16% исследованных мирных и хищных рыб, соответственно. Больше всего представителей хищных видов рыб с концентрациями Hg в мышцах, превышающими принятые нормативы, зарегистрировано в малых озерах с заболоченными водосборными бассейнами, меньше – в водохранилищах, редко – в средних по площади водного зеркала озерах. Пределы допустимого содержания ртути в рыбе и рыбной продукции, установленные в РФ, соответствуют или близки к действующим нормативам, принятым в странах Европейского сообщества, США и рекомендациям ВОЗ, хотя детализации регламента по возрастным группам и группам риска не существует.

Ключевые слова: рыбы, нормативы по содержанию Hg в рыбной продукции, Ярославская область.

DOI: 10.47021/0320-3557-2022-34-56

ВВЕДЕНИЕ

Ртуть (Hg) и ее соединения относятся к приоритетным глобальным загрязняющим веществам [UNEP, 2013]. Перенос металла в атмосфере на значительные расстояния, биоаккумуляция и биотрансформация в экосистемах (особенно водных), высокая токсичность органических соединений, в первую очередь метилртути (MeHg), для живых организмов делают обязательным экологический и санитарно-гигиенический контроль за Hg в окружающей среде, продуктах питания, медицинских препаратах и т. д. [Сульдина, 2016 (Sul'dina, 2016); Горбунов и др., 2017 (Gorbunov et al., 2017); Soltani et al., 2021].

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) рассматривает Hg в качестве одного из десяти основных химических веществ или групп химических веществ, представляющих значительную проблему для общественного здравоохранения [WHO, 2017]. Последствия воздействия Hg, в том числе, при хроническом дозированном поступлении ее малых количеств [WHO, 2007] представляют серьезную угрозу для экосистем и здоровья людей [Driscoll et al., 2013]. В различных формах Hg вызывает имму-

нотоксичность [Hawley et al., 2009; Lewis et al., 2013; Hui et al., 2016; Crowe et al., 2017] и нефротоксичность [Tchounwou et al., 2003], снижает неврологические способности и нейроповеденческие функции [Scheuhammer, Sandheinrich, 2008; Depew et al., 2012; Bridges et al., 2016; Landler et al., 2017], негативно влияет на сердечно-сосудистую систему [Houston, 2011; Valeraa et al., 2013] и репродуктивную функцию [Rice et al., 2014; WHO, 2017]. Аккумуляция Hg в организме беременных женщин повышает в будущем риск развития у детей поведенческих нарушений, таких, как синдром гиперактивности, дефицита внимания, задержки умственного и физического развития [Grandjean et al., 2001; Julvez et al., 2013].

В организм человека, проживающего на территории без локальных источников металла или не подверженного его воздействию в условиях промышленного производства, Hg поступает с пищей (морская и пресноводная рыба, морепродукты) преимущественно в наиболее токсичной форме MeHg [Myers, 2007; Marrugo-Negrete et al., 2008]. Оценка объемов потребления рыбы и рыбопродуктов

населением РФ, проводимая Федеральной службой государственной статистики, основывается в том числе и на результатах выборочного обследования бюджетов домашних хозяйств (ДХ) [РОССТАТ, 2021 (ROSSTAT, 2021)]. Информация предоставляется по всем ДХ, отдельно по проживающим в городской и сельской местности, а также имеющим различные социально-демографические характеристики и уровень благосостояния. Так, в среднем по всем домохозяйствам РФ потребление рыбы и рыбопродуктов на 2020 г. составило 22 кг на потребителя в год (эта цифра почти не меняется с 2010 г.). По Ярославской области – 18 кг на потребителя в год, граничащим с ней Московской – 27.3, Владимирской – 24.9, Вологодской – 15.4, Костромской – 22.3, Ивановской – 26.8 и Тверской – 24.4. При этом отчетливо прослеживаются следующие тенденции в потреблении рыбы и рыбопродуктов населением. Снижение потребления с увеличением числа взрослых членов ДХ и детей. Увеличение – при наличии в ДХ только неработающих пенсионеров и инвалидов, повышением уровня доходов. В РФ вклад рыбы и рыбопродуктов в общее поступление Hg в организм человека является определяющим и составляет около 50% [Горбунов и др., 2017 (Gorbulnov et al., 2017)].

Рыболовство – одна из форм производственной деятельности и традиционных занятий населения Северо-Запада России [Борисов и др., 2019 (Borisov et al., 2019)]. Ихтиофауна Ярославской области, насчитывает >40 видов рыб [Доклад о состоянии..., 2017 (Doklad o sostoyanii..., 2017)]. Промысловое значение имеют 15: основные – лещ, плотва, синец, окунь, судак, густера, чехонь, налим, щука и сом, среди которых первые пять в Рыбинском водохранилище составляют 90% от числа или массы пойманных рыб. К объектам не только промышленного, но и спортивно-любительского рыболовства, относятся окунь, судак, плотва и щука, в меньшей степени – лещ, синец, налим и берш. В настоящее время число рыбаков-любителей, посещающих водоемы области, в том числе, Рыбинское водохранилище, стабилизировалось. Вместе с тем увеличение эффективности применяемых любителями орудий лова способствует тому, что вылов ими рыбы соизмерим с промысловым. В зависимости от условий обитания (типологических, гидрохимических и гидрологических особенностей водосбора) концентрации Hg в их мышцах варьируют в диапазоне от значений ниже порога определения до 3.0 мг/кг сырой массы [Haines et al., 1992; Гремячих и др.,

2019 (Gremyachix et al., 2019)]. И это при том, что Правительством Ярославской области и Департаментом охраны окружающей среды и природопользования принимаются необходимые меры по снижению негативного воздействия на состояние естественных экологических систем промышленных и твердых коммунальных отходов (включая утилизацию опасных отходов), а также осуществляются системные мероприятия по комплексному решению проблем отходов производства и потребления [Доклад о состоянии..., 2017 (Doklad o sostoyanii..., 2017)]. В соответствии с санитарно-эпидемиологическими правилами и нормами Российской Федерации предельно допустимые уровни содержания Hg в тканях пресноводных рыб составляют 0.30 мг/кг сырой массы для представителей мирных и 0.60 мг/кг – хищных видов [СанПиН 2.3.2. 1078-01 (SanPiN 2.3.2. 1078-01)]. Потребление населением рыбы с более высокими концентрациями Hg рекомендовано ограничить с целью недопущения негативных последствий для здоровья. Однако рекомендации не учитывают индивидуальные особенности потребителя, такие как возраст, массу тела, количество рыбы в рационе питания (например, г/нед) и аналогичные среднестатистические характеристики отдельных групп населения разных российских регионов.

ВОЗ, Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (ВОЗ/ФАО), Европейский департамент безопасности пищевых продуктов (EFSA) и Агентство по охране окружающей среды США (United States Environmental Protection Agency, US EPA) определяют допустимые (не приносящие вреда здоровью) количества Hg, поступающей в организм человека с учетом его принадлежности к определенной возрастной группе (дети дошкольного и школьного возраста, взрослые), средней массы тела, частоты и длительности употребления продукта с известным содержанием Hg [US EPA, 2000; COT, 2003; UNEP, 2011; EFSA 2012; WHO, 2017]. Допустимое недельное поступление ртути в организм человека, рекомендованное US EPA – 0.0007 мкг/г массы тела в неделю [US EPA 2000]; ВОЗ/ ФАО – 0.0016 мкг/г массы тела в неделю [COT, 2003].

На основе отечественных нормативных документов [СанПиН 2.3.2. 1078-01 (SanPiN 2.3.2. 1078-01)] количество безопасной дозы Hg, поступающей в организм человека с рыбой, оценивали и ранее [Комов, Степанова, 2001 (Komov, Stepanova, 2001); Комов и др., 2004 (Komov et al., 2004); Горбунов и др., 2016

(Gorbunov et al., 2016); Горбунов и др., 2017 (Gorbunov et al., 2017); Комов и др., 2017 (Komov et al., 2017); Гремячих и др., 2019 (Gremyachix et al., 2019)]. Однако число исследованных видов рыб было не велико (чаще всего окунь и щука), либо их объединяли в большие группы: морские и пресноводные рыбы, хищные и мирные, озерные и речные и т.д. В последнее время появились работы с более детальным анализом условий безопасного для здоровья населения потребления рыбы и рыбопродуктов, содержащих Hg: по отдельным видам рыб, трофической специализации, географической приуроченности и типам водоемов их обитания, а также конкретным возрастным группам населения, для которых рассчитываются дозы (порции в пищевом рационе) [Ivanova et al., 2022]. Попыток оценить безопасность употребления рыбы населением Ярославской области на основе расчета безопасной дозы металла (с учетом минимального

негативного эффекта на здоровье, наблюдаемого при потреблении определенного количества Hg, коэффициентов выведения и усвоения в организме) до сих пор не предпринимали.

Цель работы – 1) определить концентрации Hg у представителей разных видов рыб водоемов Ярославской области, имеющих промысловое значение или относящихся к объектам спортивно-любительского рыболовства; 2) проанализировать зависимость содержания металла у различных видов от показателей массы, трофической специализации, а также типа водоема обитания; 3) оценить безопасные объемы потребления рыбы населением Ярославской области, с учетом принятых в РФ санитарно-гигиенических правил и норм, и сравнить их с безопасной дозой Hg, рассчитанной в соответствии с рекомендациями ВОЗ и Агентства по охране окружающей среды США.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отлов рыб проводился в 1997–2021 гг. в водоемах Ярославской (северо-запад европейской части России: северная и южная точки – 56°33' и 58°55' с.ш.; западная и восточная – 37°21' и 41°12' в.д.) и прилегающих к ней территорий соседних Вологодской и Тверской областей (рис.1).

Исследованные водоемы: Рыбинское (58°22'с.ш., 38°25' в.д.) и Угличское (57°29'с.ш., 38°16' в.д.) водохранилища, два средних озера Ярославской области: Плещеево (56°46'с.ш., 38°47' в.д.) в Переславском районе и Неро (57°10'с.ш., 39°26' в.д.) в Ростовском, отнесенные в эту категорию по размерам площади водного зеркала (>10 и <100 км²) согласно классификации, предложенной П.В. Ивановым [Иванов, 1948 (Ivanov, 1948)], девять малых озер (площадь водного зеркала >1 и <10 км²): оз. Чистое (57°42'с.ш., 40°33' в.д.) в Некрасовском районе, Вашутинское (56°53'с.ш., 39°03' в.д.) в Ростовском и озера Змеиное, Мотыкино, Темное, Дорожив, Изможевское, Утешково и Хотавец в Дарвинском заповеднике (58°35'с.ш., 37°59' в.д.), Брейтовский район Ярославской области и Череповецкий район Вологодской. Озера Чистое, Вашутинское и два озера заповедника Изможевское и Хотавец – с нейтральными значениями pH воды, остальные – кислотные, уровень pH воды в которых не превышает 5.0.

Всего было отобрано 979 экз. рыб следующих видов: 10 экз. уклейки *Alburnus alburnus* (L., 1758), 70 – плотвы *Rutilus rutilus* (L.,

1758), 12 – ряпушки *Coregonus albula* (L., 1758), 9 – густеры *Blicca bjoerkna* (L., 1758), 213 – леща *Abramis brama* (L., 1758), 10 – налима *Lota lota* (L., 1758), 62 – судака *Sander lucioperca* (L., 1758), 554 – окуня *Perca fluviatilis* (L., 1758) и 39 экз. щуки *Esox lucius* (L., 1758).

Рыбу отлавливали на удочку, неводом, ставными сетями и донным тралом; замораживали (-14°C) и хранили до определения содержания Hg в мышцах. Перед анализом измеряли длину и массу тела рыбы, отбирали образцы мышц из средней дорзальной части тела между боковой линией и спинным плавником. Все исследования на животных проводили в соответствии с этическими стандартами, изложенными в Хельсинской декларации 1964 г. и более поздних ее редакциях.

Содержание ртути в мышцах (мг/кг сырой массы) определяли в двух–трех повторностях атомно-абсорбционным методом на ртутном анализаторе РА-915+ с приставкой ПИРО (Люм-экс) без предварительной подготовки проб. Точность аналитических методов измерения контролировали после каждых 30 измерений (относительная разность в процентах <20%) с помощью сертифицированного биологического материала DORM-2 и DOLM-2 (Институт химии окружающей среды, Оттава, Канада). Пределы обнаружения на приборе Hg в биологических образцах – 0.0005–2.0000 мг/кг. Различия данных между повторностями в среднем составили 8.3% (в пределах 0.2–11.6%).

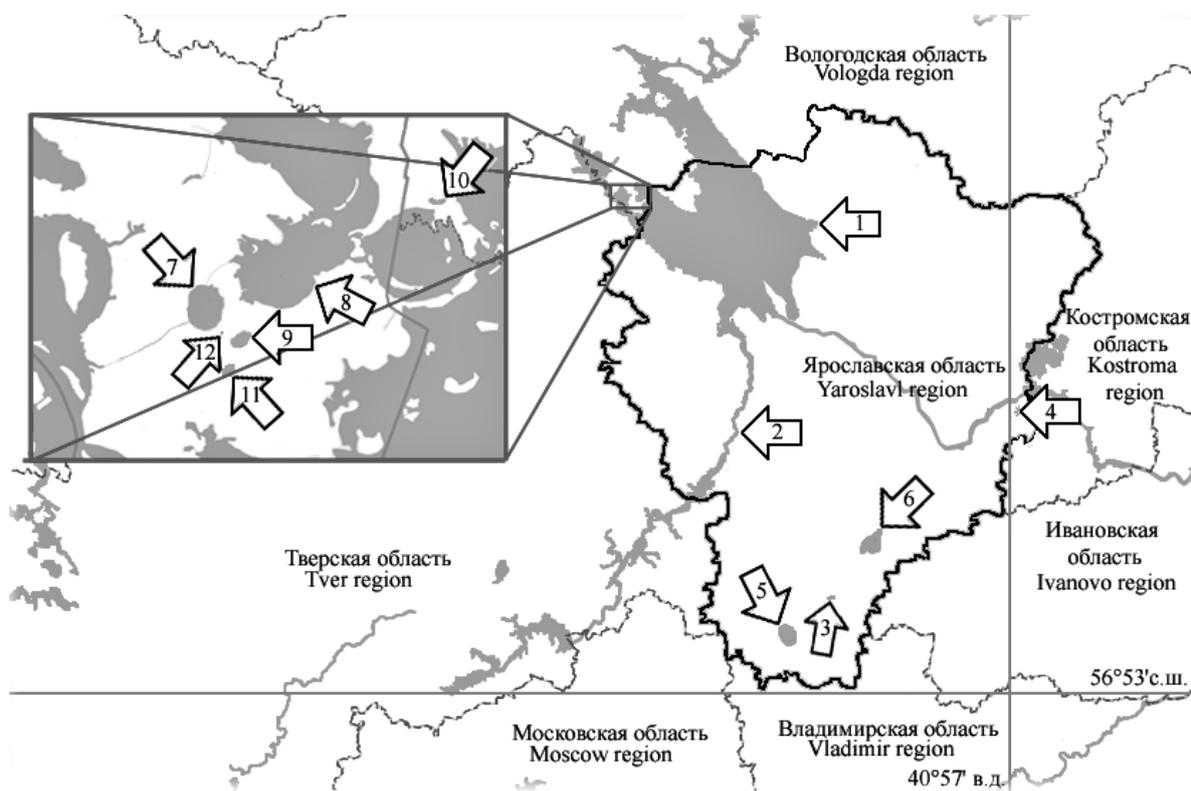


Рис. 1. Карта-схема исследованных водоемов Ярославской области и прилегающих территорий: 1 – Рыбинское водохранилище, 2 – Угличское водохранилище, 3 – оз. Вашутинское, 4 – оз. Чистое, 5 – оз. Плещеево, 6 – оз. Неро; Вологодская обл. (группа озер Дарвинского биосферного заповедника): 7 – оз. Хотавец, 8 – оз. Изможевское, 9 – оз. Дубровское, 10 – оз. Утешково, 11 – оз. Мотыкино, 12 – оз. Змеиное.

Fig. 1. Outline map of the studied reservoirs of the Yaroslavl region and adjacent territories: 1 - Rybinsk Reservoir, 2 - Uglich Reservoir, 3 - Lake Vashutinskoe, 4 - Lake Chistoye, 5 - Lake Pleshcheyevo, 6 - Lake Nero; Vologda Region (a group of lakes in the Darwin Biosphere Reserve): 7 - Lake Hotavets, 8 - Lake Izmozhevskoye, 9 - Lake Dubrovskoe, 10 - Lake Uteshskovo, 11 - Lake Motykinno, 12 - Lake Zmeinoye.

В РФ регулирование поступления Hg в организм человека с пищей предполагает ограничение потребления рыбы с концентрацией металла выше нормативных значений. Более эффективным может быть дифференциальный подход к оценке безопасности рыбы и морепродуктов в рационе населения. В его основе лежит расчет допустимой безопасной дозы Hg, учитывающий минимальный негативный эффект на здоровье при поступлении определенного количества соединений металла в организм человека, или определение максимально допустимого количества Hg в рыбе при заданном уровне потребления (порции в неделю). Соответствующие рекомендации разработаны ВОЗ /ФАО [COT, 2003], Европейским департаментом безопасности пищевых продуктов [EFSA, 2012] и Агентством по охране

окружающей среды США [US EPA, 2000]. Формулы для расчета допустимого потребления рыбы населением разных возрастных групп, а также максимально допустимого количества в ней Hg при определенном уровне потребления приведены в статье Е.С. Ивановой с соавторами [Ivanova et al., 2022].

Данные о концентрациях Hg представлены в виде средних значений и их ошибок ($\bar{x} \pm m\bar{x}$) с указанием min–max. Поскольку распределение данных отличалось от нормального (критерий Шапиро–Уилка), для выявления корреляционных связей между исследуемыми показателями использован непараметрический критерий Спирмена, для оценки значимости различий между выборками – медианный Краскела–Уоллиса (различия достоверны при $p < 0.05$) [Sokal, Rohlf, 1995].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Содержание Hg в мышцах рыб Ярославской области варьирует в пределах от 0.004–0.010 мг/кг (плотва, ряпушка, густера, окунь) до 1.92 мг/кг (щука), при этом максимальные индивидуальные концентрации Hg в мышцах, превышающие принятые в РФ нормативные

значения, достигают у плотвы 0.36, судака – 0.74, окуня – 1.44, щуки – 1.92 мг/кг. Минимальные средние значения отмечены в мышцах ряпушки и густеры (0.03 мг/кг), максимальные – у окуня и щуки (0.31 и 0.41) (табл. 1). Между видами с разной трофической

специализацией (мирные или хищные) отмечены значимые различия в концентрациях металла в мышцах: 0.08 мг/кг (315 экз.) и 0.30 (664 экз.), соответственно.

Наибольшее число достоверных положительных корреляционных связей между содержанием Hg в мышцах и массой тела отме-

чено у рыб из водохранилищ: плотвы, налима, судака, окуня и щуки (табл. 2). В средних озерах – плотвы и окуня, но у плотвы она отрицательная, а у окуня менее выражена, чем у рыб, отловленных в водохранилищах. У плотвы и окуня из малых озер связь между показателями не выявлена.

Таблица 1. Содержание ртути в мышцах разных видов рыб (мг/кг сырой массы) Ярославской области

Table 1. The content of mercury in the muscles of different fish species (mg/kg wet weight) of the Yaroslavl region

Группы водоемов Groups of water bodies	Трофическая специализация вида Trophic specialization of the species	N п/п	Вид Species	n	Масса, г Weight, g	Hg мг/кг сырой массы Hg mg/kg wet weight	H* H*
По всем водоемам All water bodies	Мирные Non-predatory	1	Уклея Bleak	10	<u>41.5±0.7</u> 38.1–44.8	<u>0.11±0.01</u> 0.06–0.13	a
		2	Плотва Roach	70	<u>91.1±12.3</u> 11.3–450.0	<u>0.07±0.01</u> 0.01–0.36	a
		3	Ряпушка Vendace	12	<u>73.0±5.5</u> 47.4–102.0	<u>0.03±0.003</u> 0.01–0.05	a
		4	Густера Silver bream	9	<u>82.1±15.6</u> 54.6–196.0	<u>0.03±0.006</u> 0.004–0.06	a
		5	Лещ Bream	213	<u>579.7±12.2</u> 142.0–1145.0	<u>0.09±0.003</u> 0.02–0.27	a
	Хищные Predatory	6	Налим Burbot	10	<u>948.2±191.8</u> 203.0–2262.0	<u>0.14±0.02</u> 0.02–0.21	a
		7	Судак Pikeperch	62	<u>702.1±151.1</u> 66.6–7500.0	<u>0.12±0.01</u> 0.05–0.74	a
		8	Окунь Perch	554	<u>131.9±8.6</u> 3.0–1543.0	<u>0.31±0.01</u> 0.01–1.44	b
		9	Щука Pike	39	<u>3270.5±404.3</u> 186.0–9950.0	<u>0.41±0.06</u> 0.06–1.92	b
	По всем видам All species				979	<u>392.6±27.8</u> 3.0–9950.0	<u>0.23±0.01</u> 0.004–1.92
Водохранилища Reservoirs	Мирные Non-predatory	1	Плотва Roach	31	<u>100.8±25.3</u> 11.3–450.0	<u>0.09±0.02</u> 0.02–0.36	a
		2	Лещ Bream	205	<u>573.8±12.2</u> 142.0–1145.0	<u>0.09±0.003</u> 0.03–0.27	a
		3	Налим Burbot	10	<u>948.2±191.8</u> 203.0–2262.0	<u>0.14±0.2</u> 0.02–0.21	abc
	Хищные Predatory	4	Судак Pikeperch	62	<u>702.1±151.1</u> 66.6–7500.0	<u>0.12±0.0</u> 0.05–0.74	b
		5	Окунь Perch	212	<u>212.6±19.3</u> 3.0–1543.0	<u>0.21±0.01</u> 0.01–0.82	b
		6	Щука Pike	39	<u>3270.4±404.3</u> 186.0–9950.0	<u>0.41±0.06</u> 0.06–1.9	c
	По всем видам All species				559	<u>619.1±46.6</u> 3.0–9950	<u>0.16±0.01</u> 0.01–1.92
Средние озера Medium-sized lakes	Мирные Non-predatory	1	Уклея Bleak	10	<u>41.5±0.7</u> 38.1–44.8	<u>0.11±0.01</u> 0.06–0.13	c
		2	Плотва Roach	24	<u>199.8±51.1</u> 56.8–1237.0	<u>0.03±0.003</u> 0.01–0.07	a
		3	Ряпушка Vendace	12	<u>73.0±5.5</u> 47.4–102.0	<u>0.03±0.003</u> 0.01–0.05	a
		4	Лещ Bream	8	<u>732.3±63.3</u> 541.0–1137.0	<u>0.03±0.003</u> 0.02–0.004	a
	Хищные Predatory	5	Окунь Perch	107	<u>127.1±16.3</u> 15.1–1011.0	<u>0.06±0.01</u> 0.01–0.40	b
		По всем видам All species				161	<u>158.9±17.3</u> 15.1–1237.0

Группы водоемов Groups of water bodies	Трофическая специализация вида Trophic specialization of the species	N п/п	Вид Species	n	Масса, г Weight, g	Hg мг/кг сырой массы Hg mg/kg wet weight	H* H*
Малые озера Small lakes	Мирные Non-predatory	1	Плотва Roach	19	<u>47.2±6.1</u> 22.7–100.8	<u>0.07±0.004</u> 0.04–0.10	a
		2	Густера Silver bream	9	<u>82.1±15.6</u> 54.6–195.9	<u>0.03±0.01</u> 0.004–0.06	a
	Хищные Predatory По всем видам All types	3	Окунь Perch	235	<u>91.3±2.8</u> 5.8–339.0	<u>0.51±0.20</u> 0.02–1.44	b
				263	<u>61.0±2.6</u> 5.8–339.0	<u>0.47±0.02</u> 0.004–1.44	

Примечание. n – объем выборки; m – масса (над чертой – средние значения и их ошибки ($x \pm m_x$), под чертой – min и max значения). H* – достоверность различий между выборками рыб по H-критерию Крускала-Уоллиса при $p \leq 0.05$: разные буквы (a, b и c) означают достоверные различия концентраций Hg в выборках (во всех водоемах и в пределах отдельных групп водоемов), начиная с минимальных значений (a) и заканчивая максимальными (c).

Note. n – is the sample size; m – weight (is above the line – average values and their standard errors ($x \pm m_x$), is below the line – min and max values). H* – significance of differences between fish samples according to the Kruskal-Wallis H-test at $p \leq 0.05$: different letters (a, b, and c) mean significant differences in Hg concentrations in the samples (in all water bodies and within individual groups of water bodies), starting from the minimum values (a) and ending with the maximum values (c).

Таблица 2. Корреляционная связь между содержанием Hg в мышцах и массой тела рыб

Table 2. Correlations between Hg content in muscles and body weight of fish

Вид Species	Все водоемы All water bodies		Водохранилища Reservoirs		Средние озера Medium-sized lakes		Малые озера Small lakes	
	n	r_s	n	r_s	n	r_s	n	r_s
Уклея Bleak	10	-0.23	–	–	10	-0.23	–	–
Плотва Roach	70	0.22	31	0.57	24	-0.51	19	0.17
Ряпушка Vendace	12	0.21	–	–	12	0.21	–	–
Густера Silver bream	9	0.36	–	–	–	–	9	0.36
Лещ Bream	213	-0.09	205	-0.04	8	0.30	–	–
Налим Vurbot	10	0.70	10	0.70	–	–	–	–
Судак Pikereperch	62	0.38	62	0.38	–	–	–	–
Окунь Perch	554	0.10	212	0.76	107	0.27	235	-0.1
Щука Pike	39	0.61	39	0.58	–	–	–	–

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые корреляции (коэффициент ранговой корреляции Спирмена при $p \leq 0.05$), “–” – здесь и далее данные отсутствуют.

Note. Statistically significant correlations are marked in bold (Spearman's rank correlation coefficient at $p \leq 0.05$), “–” – here and below no data.

В выборках всех трех групп водоемов присутствовали два вида рыб – плотва и окунь. Поэтому только для них было возможно сравнение концентраций Hg в мышцах, зависящее от специфических условий водоемов обитания (рис. 2). Самые низкие концентрации Hg отмечены у рыб из средних озер: у плотвы (0.03 мг/кг) и окуня (0.06). Выше – из водохра-

нилищ: 0.09 и 0.21, соответственно. Самые высокие – у окуня из малых озер (0.51). Однако в группе малых озер среднее содержание металла в мышцах окуня из acidных водоемов заповедника (Змеиное, Мотыкино, Темное, Дорожив и Утешково) – 0.62 мг/кг, нейтральных (Изможевское и Хотавец) – 0.11; нейтральных, не расположенных на территории заповедника, – 0.05

(во всех возможных сравниваемых парах различия статистически значимы). В мышцах окуня и плотвы из нейтрального оз. Хотавец концентрации Hg достоверно не различались, в то время как в группах водохранилищ и крупных озер у хищного окуня Hg было значимо выше, чем у мирной плотвы.

Среди исследованных рыб (979 экз.) доля особей с концентрацией Hg в мышцах выше

принятых в РФ санитарно-гигиенических нормативов составила: >0.30 мг/кг – 26%, >0.60 мг/кг – 11% (табл. 3). Самая высокая доля рыб с концентрациями, превышающими нормативы, отмечена в выборках из малых озер; существенно ниже (в 3–10 раз) – в выборках из водохранилищ; самая низкая – средних озер (табл. 3).

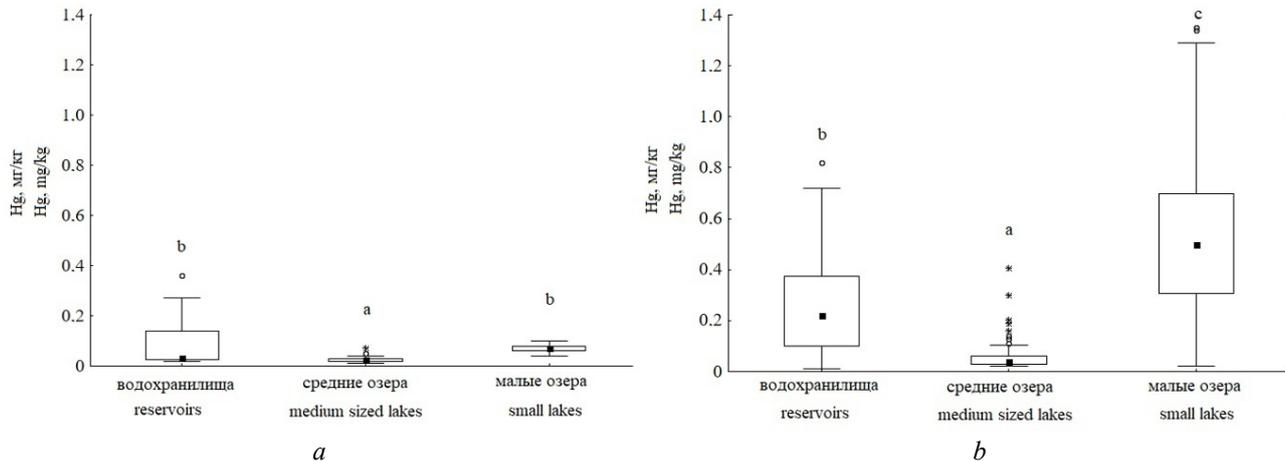


Рис. 2. Содержание ртути в мышцах плотвы (а) и окуня (b), отловленных в водоемах Ярославской области и прилегающих территорий соседних областей. Разные буквы (а, b и с) означают достоверные различия концентраций Hg в выборках рыб, начиная с минимальных значений (а) и заканчивая максимальными (с в нашем случае) по H-критерию Крускала-Уоллеса при $p \leq 0.05$.

Fig. 2. The content of mercury in the muscles of roach (a) and perch (b) caught in water bodies of the Yaroslavl region and adjacent parts of neighboring regions. Different letters (a, b, and c) indicate significant differences in Hg concentrations in fish samples, starting from the minimum values (a) and ending with the maximum values (c in our case) according to the Kruskal-Wallis H-test at $p \leq 0.05$.

Таблица 3. Соответствие содержания Hg в мышцах рыб из разных групп водоемов санитарно-гигиеническим нормативам РФ

Table 3. Compliance of the Hg content in the muscles of fish from different groups of water bodies with the sanitary and hygienic standards of the Russian Federation

Группы водоемов Groups of water bodies	n	Количество рыб с содержанием Hg в мышцах ≤ 0.29 мг/кг Number of fish with Hg in muscles ≤ 0.29 mg/kg		Количество рыб с содержанием Hg в мышцах 0.30–0.59 мг/кг Number of fish with Hg in muscles 0.30–0.59 mg/kg		Количество рыб с содержанием Hg в мышцах ≥ 0.60 мг/кг Number of fish with Hg in muscles ≥ 0.60 mg/kg	
		экз.	%	экз.	%	экз.	%
По всем водоемам All water bodies	979	729	74	143	15	107	11
Водохранилища Reservoirs	559	488	87	56	10	15	3
Средние озера Medium-sized lakes	157	155	99	2	1		
Малые озера Small lakes	263	86	33	85	32	92	35

В группе мирных видов (315 экз.) концентрация Hg >0.30 мг/кг зарегистрирована только у одной плотвы из Рыбинского водохранилища. В группе хищных (664 экз.) доля рыб с концентрацией Hg >0.30 мг/кг составила 37%, >0.60 мг/кг – 16%, по группам водоемов

снижаясь от малых озер, к водохранилищам и средним озерам (табл. 4). Самый высокий процент особей, содержание металла в мышцах которых превышает допустимые величины, приходится на щуку и окуня (табл. 5).

Таблица 4. Доля мирных и хищных видов рыб по группам водоемов и по категориям санитарно-гигиенических нормативов РФ**Table 4.** The proportion of non-predatory and predatory fish species by groups of water bodies and by categories of sanitary and hygienic standards of the Russian Federation

Трофический статус Trophic status	Группы водоемов Groups of water bodies	n	Количество рыб с содержанием Hg в мышцах ≤ 0.29 мг/кг Number of fish with Hg in muscles ≤ 0.29 mg/kg		Количество рыб с содержанием Hg в мышцах 0.30–0.59 мг/кг Number of fish with Hg in muscles 0.30–0.59 mg/kg		Количество рыб с содержанием Hg в мышцах ≥ 0.60 мг/кг Number of fish with Hg in muscles ≥ 0.60 mg/kg	
			экз.	%	экз.	%	экз.	%
Мирные виды Non-predatory species	Водохранилища Reservoirs	236	235	99.6	1	0.4	–	–
	Средние озера Medium-sized lakes	51	51	100	–	–	–	–
	Малые озера Small lakes	28	28	100	–	–	–	–
	По всем водоемам All water bodies	315	314	99.7	1	0.3	–	–
Хищные виды Predatory species	Водохранилища Reservoirs	323	253	78	55	17	15	5
	Средние озера Medium-sized lakes	106	104	98	2	2	–	–
	Малые озера Small lakes	235	58	25	85	36	92	39
	По всем водоемам All water bodies	664	416	63	142	21	107	16

Таблица 5. Доля разных видов рыб по группам водоемов и по категориям санитарно-гигиенических нормативов РФ**Table 5.** Proportion of different fish species by groups of water bodies and by categories of sanitary and hygienic standards of the Russian Federation

Группы водоемов Groups of water bodies	Вид Species	n	Количество рыб с содержанием Hg в мышцах ≤ 0.29 мг/кг Number of fish with Hg in muscles ≤ 0.29 mg/kg		Количество рыб с содержанием Hg в мышцах 0.30–0.59 мг/кг Number of fish with Hg in muscles 0.30–0.59 mg/kg		Количество рыб с содержанием Hg в мышцах ≥ 0.60 мг/кг Number of fish with Hg in muscles ≥ 0.60 mg/kg	
			экз.	%	экз.	%	экз.	%
По всем водоемам All water bodies	Уклея Bleak	10	10	100	–	–	–	–
	Ряпушка Vendace	12	12	100	–	–	–	–
	Густера Silver bream	9	9	100	–	–	–	–
	Лещ Bream	213	213	100	–	–	–	–
	Налим Burbot	10	10	100	–	–	–	–
	Плотва Roach	70	69	99	1	1	–	–
	Судак Pikeperch	62	61	98	–	–	1	2
	Окунь Perch	554	325	59	132	24	97	17
	Щука Pike	39	20	51	10	26	9	23
	Всего / All	979	729	74	143	15	107	11

Группы водоемов Groups of water bodies	Вид Species	n	Количество рыб с содержанием Hg в мышцах ≤ 0.29 мг/кг Number of fish with Hg in muscles ≤ 0.29 mg/kg		Количество рыб с содержанием Hg в мышцах 0.30–0.59 мг/кг Number of fish with Hg in muscles 0.30–0.59 mg/kg		Количество рыб с содержанием Hg в мышцах ≥ 0.60 мг/кг Number of fish with Hg in muscles ≥ 0.60 mg/kg		
			экз.	%	экз.	%	экз.	%	
			Водохранилища Reservoirs	Лещ Bream	205	205	100	–	–
Налим burbot	10	10		100	–	–	–	–	
Плотва Roach	31	30		97	1	3	–	–	
Судак Pikeperch	62	61		98	–	–	1	2	
Окунь Perch	212	162		77	45	21	5	2	
Щука Pike	39	20		51	10	26	9	23	
Всего / All	559	488		87	56	10	15	3	
Средние озера Medium-sized lakes	Уклея Bleak	10		10	100	–	–	–	–
	Плотва Roach	20	20	100	–	–	–	–	
	Ряпушка Vendace	12	12	100	–	–	–	–	
	Лещ Bream	8	8	100	–	–	–	–	
	Окунь Perch	107	105	98	2	2	–	–	
	Всего / All	157	155	99	2	1	–	–	
	Малые озера Small lakes	Плотва Roach	19	19	100	–	–	–	–
		Густера Silver bream	9	9	100	–	–	–	–
Окунь Perch		235	58	25	85	36	92	39	
Всего / All		263	86	33	85	32	92	35	

Таким образом, ограничения в потреблении рыбы населением Ярославской области касаются в первую очередь окуней из водохранилищ и малых кислотных озер, а также щук и в редких случаях судаков из водохранилищ.

С учетом рекомендаций US EPA безопасное недельное употребление разных видов рыб из водоемов Ярославской области составляет: 27–373 г/нед (<1 –5 порц./нед) для детей 2–5 лет; 44–607 г/нед (<1 –7 порц./нед) – 6–10 лет и 96–1633 г/нед (1–11 порц./нед) для взрослого населения; FAO/ВОЗ – 60–853 г/нед (1–12 порц./нед); 101–1387 г/нед (1–15 порц./нед) и 273–3733 г/нед (1–25 порц./нед), соответственно (табл. 6).

Безопасное количество Hg в рыбе для разных возрастных групп населения и при известном уровне потребления приведены в табл. 7. Верхние и нижние границы интервалов допустимых концентраций Hg при задан-

ных условиях рассчитаны на основании данных Агентства по охране окружающей среды США по оценке химического загрязнения рыбной продукции [US EPA, 2000].

Доля рыб из разных групп водоемов, рекомендованная к употреблению в объемах 1–3 порц./нед или исключенная из пищевого рациона населения Ярославской области в возрасте 2–5, 6–10 лет и старше приведена в табл. 8.

В среднем по всем группам водоемов и исследованным видам рыб из употребления рекомендуется исключить 36% рыб – детям в возрасте 2–5 лет, 32% – 6–10 лет и 24% – взрослому населению (рис. 3а).

В водохранилищах и средних озерах процент, рекомендованных к исключению из рациона населения рыб ниже (для средних озер – существенно ниже), в малых – 2–3 раза выше, в основном за счет рыбы из кислотных

водоемов Дарвинского заповедника. Таким образом, доля рыб из категории “исключить из потребления”, рассчитанная согласно рекомендациям ВОЗ/ФАО, Европейского департамента безопасности пищевых продуктов и Агентства по охране окружающей среды США, выше доли рыб, не рекомендованной к употреблению санитарно-гигиеническими нормативами РФ.

По отдельным видам для указанных возрастных категорий исключить из употребления

из хищных видов рыб: 16, 13 и 3% исследованных экземпляров судака; 55, 50 и 39% окуня и 72, 69 и 41% щуки (рис. 3б). Мирных: 10, 6 и 1% плотвы и 3, 1 и 0% леща. Выборки уклей, ряпушки, густеры и налима малочисленны. Однако максимальные индивидуальные значения концентраций Hg в мышцах уклей, ряпушки и густеры ниже 0.17 мг/кг (у ряпушки и густеры существенно ниже), налима – 0.21 мг Hg/кг.

Таблица 6. Допустимое безопасное количество рыбы (г/нед) и порций (шт.) ее употребления населением Ярославской области в соответствии с рекомендациями Агентства по охране окружающей среды США и ВОЗ/ФАО

Table 6. Permissible safe amount (g/week) and portions (pieces) of fish consumption by the population of the Yaroslavl region in accordance with the recommendations of the US Environmental Protection Agency and WHO/FAO

Группы водоемов Groups reservoirs	Вид Species	n	Hg мг/кг сырой массы Hg mg/kg wet weight	Агентство по охране окружающей среды США US Environmental Protection Agency			ВОЗ/ ФАО WHO/FAO		
				2–5 лет 2–5 years	6–10 лет 6–10 years	Взрослые Adults	2–5 лет 2–5 years	6–10 лет 6–10 years	Взрослые Adults
По всем водоемам All water bodies	Уклея Bleak	10	0.11	102 (1)	165 (2)	445 (3)	233 (3)	378 (4)	1018 (7)
	Плотва Roach	70	0.07	160 (2)	260 (3)	700 (5)	366 (5)	594 (7)	1600 (11)
	Ряпушка Vendace	12	0.03	373 (5)	607 (7)	1633 (11)	853 (12)	1387 (15)	3733 (25)
	Густера Silver bream	9	0.03	373 (5)	607 (7)	1633 (11)	853 (12)	1387 (15)	3733 (25)
	Лещ Bream	213	0.09	124 (2)	202 (2)	544 (4)	284 (4)	462 (5)	1244 (8)
	Налим Burbot	10	0.14	80 (1)	130 (1)	350 (2)	183 (3)	297 (3)	800 (5)
	Судак Pikeperch	62	0.12	93 (1)	152 (2)	408 (3)	213 (3)	347 (4)	933 (6)
	Окунь Perch	554	0.31	36 (1)	59 (1)	158 (1)	83 (1)	134 (1)	361 (2)
	Щука Pike	39	0.41	27 (<1)	44 (<1)	120 (1)	62 (1)	101 (1)	273 (2)
	По всем видам All species	979	0.23	49 (1)	79 (1)	213 (1)	111 (2)	181 (2)	487 (3)
Водохранилища Reservoirs	Плотва Roach	31	0.09	124 (2)	202 (2)	544 (4)	284 (4)	462 (5)	1244 (8)
	Лещ Bream	205	0.09	124 (2)	202 (2)	544 (4)	284 (4)	462 (5)	1244 (8)
	Налим Burbot	10	0.14	80 (1)	130 (1)	350 (2)	183 (3)	297 (3)	800 (5)
	Судак Pikeperch	62	0.12	93 (1)	152 (2)	408 (3)	213 (3)	347 (4)	933 (6)
	Окунь Perch	212	0.21	53 (1)	87 (1)	233 (2)	122 (2)	198 (2)	533 (4)
	Щука Pike	39	0.41	27 (<1)	44 (<1)	120 (1)	62 (1)	101 (1)	273 (2)
	По всем видам All species	559	0.16	70 (1)	114 (1)	306 (2)	160 (2)	260 (3)	700 (5)

Группы водоемов Groups reservoirs	Вид Species	n	Hg мг/кг сырой массы Hg mg/kg wet weight	Агентство по охране окружающей среды США US Environmental Protection Agency			ВОЗ/ ФАО WHO/FAO		
				2–5 лет 2–5 years	6–10 лет 6–10 years	Взрослые Adults	2–5 лет 2–5 years	6–10 лет 6–10 years	Взрослые Adults
Средние озера Medium-sized lakes	Уклея Bleak	10	0.11	102 (1)	165 (2)	445 (3)	233 (3)	378 (4)	1018 (7)
	Плотва Roach	20	0.03	373 (5)	607 (7)	1633 (11)	853 (12)	1387 (15)	3733 (25)
	Ряпушка Vendace	12	0.03	373 (5)	607 (7)	1633 (11)	853 (12)	1387 (15)	3733 (25)
	Лещ Bream	8	0.03	373 (5)	607 (7)	1633 (11)	853 (12)	1387 (15)	373 (25)
	Окунь Perch	107	0.06	187 (3)	303 (3)	817 (5)	427 (6)	693 (8)	1867 (12)
	По всем видам All species	157	0.06	187 (3)	303 (3)	817 (5)	427 (6)	693 (8)	1867 (12)
Малые озера Small lakes	Плотва Roach	19	0.07	160 (2)	260 (3)	700 (5)	366 (5)	594 (7)	1600 (11)
	Густера Silver ream	9	0.03	373 (5)	607 (7)	1633 (11)	853 (12)	1387 (15)	3733 (25)
	Окунь Perch	235	0.51	22 (<1)	36 (<1)	96 (1)	50 (1)	82 (1)	220 (1)
	По всем видам All species	263	0.47	24 (<1)	39 (<1)	104 (1)	54 (1)	89 (1)	238 (2)

Примечание. 2–5 лет, m ≈ 16 кг, порция = 70 г (СанПин 2.4.1.3049-13); 6-10 лет, m ≈ 26 кг, порция = 90 г (СанПин 2.4.5.2409-08); взрослый, m ≈ 70 кг, порция = 150 г.

Note. 2–5 years, m ≈ 16 kg, serving = 70 g (SanPin 2.4.1.3049-13); 6-10 years, m ≈ 26 kg, serving = 90 g (SanPin 2.4.5.2409-08); adult, m ≈ 70 kg, serving = 150 g.

Таблица 7. Максимально допустимое содержание Hg в рыбе при заданных объемах (г/нед или порц./нед) потребления рыбной продукции населением разных возрастных групп [Ivanova et al., 2022]

Table 7. The maximum allowable Hg content in fish at given volumes (g/week or portions/week) of consumption of fish products by the population of different age groups [Ivanova et al., 2022]

Рекомендации по употреблению рыбной продукции Recommendations for the use of fish products	Концентрация Hg в рыбе Hg concentration in fish		
	Дети 2–5 лет Children 2–5 years	Дети 6–10 лет Children 6–10 years	Взрослые Adults
можно употреблять до 3 порций в неделю allowed to consume up to 3 servings per week	≤0.06	≤0.07	≤0.11
можно употреблять до 2 порций в неделю allowed to consume up to 2 servings per week	≤0.08	≤0.10	≤0.16
можно употреблять не более 1 порции в неделю allowed to consume up to 1 serving per week	≤0.17	≤0.21	≤0.33
исключить из употребления exclude from diet	>0.17	>0.21	>0.33

По группам водоемов самый низкий процент рыб, не рекомендованных к употреблению, отмечен для средних озер Неро и Плещеево: 4, 2 и 1% (для трех возрастных групп). Выше –

для Рыбинского и Угличского водохранилищ: 28, 22 и 11%. Самый высокий – для малых озер (преимущественно Дарвинского заповедника): 75, 72 и 65%.

Таблица 8. Процент исследованной рыбы с различными рекомендованными безопасными порциями в неделю
Table 8. Percentage of fish examined with different recommended safe servings per week

Группы водоемов Groups of water bodies	Рекомендации по употреблению рыбы Recommendations for eating fish	Возрастные группы Age groups		
		2–5 лет 2–5 years	6–10 лет 6–10 years	взрослые adults
По всем водоемам All water bodies	Можно употреблять до 3 порций в неделю Allowed to consume up to 3 servings per week	27	32	51
	Можно употреблять до 2 порций в неделю Allowed to consume up to 2 servings per week	37	47	63
	Можно употреблять не более 1 порции в неделю Allowed to consume up to 1 serving per week	64	68	76
	Исключить из употребления Exclude from diet	36	32	24
Водохранилища Reservoirs	Можно употреблять до 3 порций в неделю Allowed to consume up to 3 servings per week	19	26	54
	Можно употреблять до 2 порций в неделю Allowed to consume up to 2 servings per week	32	47	71
	Можно употреблять не более 1 порции в неделю Allowed to consume up to 1 servings per week	72	78	89
	Исключить из употребления Exclude from diet	28	22	11
Средние озера Medium-sized lakes	Можно употреблять до 3 порций в неделю Allowed to consume up to 3 servings per week	75	77	89
	Можно употреблять до 2 порций в неделю Allowed to consume up to 2 servings per week	82	85	95
	Можно употреблять не более 1 порции в неделю Allowed to consume up to 1 servings per week	96	98	99
	Исключить из употребления Exclude from diet	4	2	1
Малые озера Small lakes	Можно употреблять до 3 порций в неделю Allowed to consume up to 3 servings per week	14	18	22
	Можно употреблять до 2 порций в неделю Allowed to consume up to 2 servings per week	20	22	25
	Можно употреблять не более 1 порции в неделю Allowed to consume up to 1 servings per week	26	28	35
	Исключить из употребления Exclude from diet	75	72	65

ОБСУЖДЕНИЕ

Потребление рыбы и рыбной продукции населением Ярославской области на протяжении последних 10 лет не меняется и составляет около 22.0 кг на потребителя в год [РОССТАТ, 2021 (ROSSTAT, 2021)]. Это количество сопоставимо со среднестатистическими данными по Северной Америке (22.4 кг на потребителя в год) и Австралии (25.9); выше, чем в Центральной Европе (до 17.0), Латинской Америке (10.5) и Африке (9.9) и ниже, чем в островных государствах Мальдивы (142.3), Сейшелы (58.3) и Япония (45.3) [FAO, 2017]. Указанные цифры приводятся в пересчете на рыбную продукцию и включают рыбу и морепродукты живые и замороженные, соленые, копченые и сушеные, рыбные консервы, полуфабрикаты и готовые изделия. В рационе населения области рыба из местных водоемов играет существенную роль. В первую очередь это касается ры-

баков – любителей и членов их семей, а также многодетных, молодых и неполных семей, имеющих детей в возрасте до 16 лет, с невысоким уровнем доходов.

Средние концентрации ртути в мышцах рыб из водоемов Ярославской области (0.03–0.41 мг/кг сырой массы) сопоставимы с заявленными Европейским агентством по безопасности продуктов питания (плотва – 0.12; лещ – 0.23; окунь – 0.17; щука – 0.39) [EFSA, 2012] и данными по рыбе из пресноводных водоемов разных регионов мира [Гремячих и др. 2013 (Gremyachix et al., 2013); Комов и др. 2014 (Komov et al., 2014); Немова и др. 2014 (Nemova et al., 2014); Горбунов и др., 2018 (Gorbunov et al., 2018); Yi and Zhang, 2012; Pal, Ghosh, 2013; Kalkan et al., 2015; Li et al., 2015; Arantes et al., 2016; Siraj et al., 2016; Milanov et al., 2016; Nikolić et al., 2021].

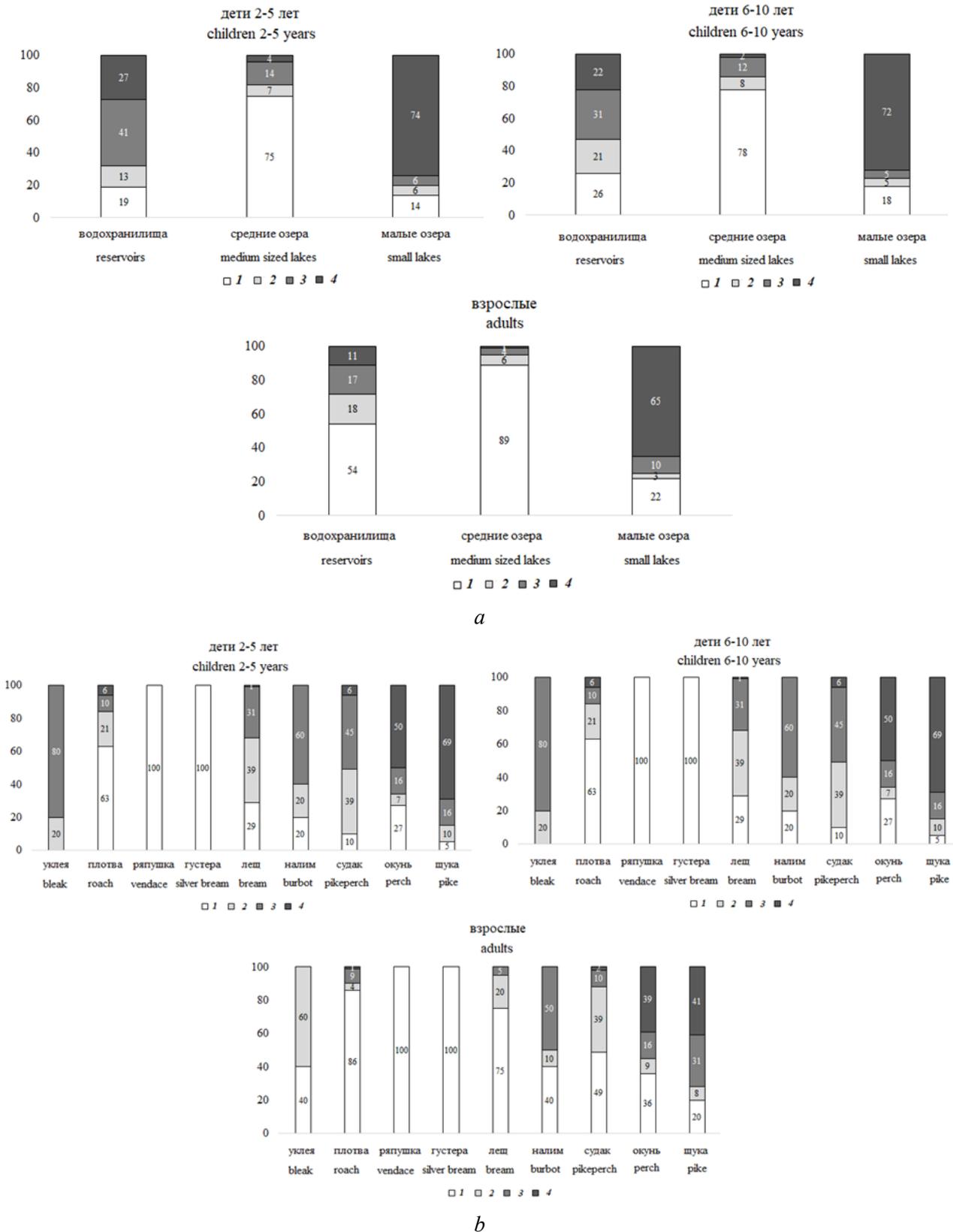


Рис. 3. Процент рыб с разным рекомендуемым безопасным количеством порций в неделю: *a* – по группам водоемов; *b* – по видам рыб (1 – можно употреблять <3 порций в неделю; 2 – можно употреблять <2 порций в неделю; 3 – нельзя употреблять >1 порции в неделю; 4 – исключить).

Fig. 3. Percentage of fish with different recommended allowance per week: *a* – by groups of water bodies; *b* – by fish species (1 – allowed up to 3 servings per week; 2 – allowed up to 2 servings per week; 3 – allowed no more than 1 serving per week; 4 – exclude from diet).

Количество Hg в исследованных рыбах Ярославской области зависит от их трофической специализации, возраста и размеров. Более высокие средние концентрации ртути в мышцах имеют хищные виды, по сравнению с мирными: 0.12–0.41 и 0.03–0.11 мг/кг сырой массы, соответственно. Долгоживущие по сравнению с короткоживущими: 0.31 – окунь, продолжительность жизни которого может достигать 23 лет, и 0.11 – уклейка с жизненным циклом 5–6 лет. Крупные особи по сравнению с мелкими того же вида: коэффициент корреляции (r_s) содержания Hg в мышцах окуня Рыбинского водохранилища с массой рыб – 0.76 при $p < 0.05$. Эти закономерности отмечались и ранее в работах отечественных и зарубежных авторов [Степанова, Комов, 1997 (Stepanova, Komov, 1997); Комов и др., 2014 (Komov et al., 2014); Sonesten, 2003; Kruzikova et al.; 2013; Luczynska et al., 2017; Soltani et al., 2021].

Среди исследованных видов рыб к мирным, питающимся зоопланктоном, зообентосом, перифитомом и водной растительностью, относятся уклейка, плотва, ряпушка, густера и лещ; хищным (ихтиофагам) – налим, судак, окунь и щука. Хищные рыбы, занимающие самое высокое положение в трофической сети водоемов, более крупные и долгоживущие могут накапливать Hg в концентрациях, представляющих угрозу для здоровья использующего их в пищу человека.

Действующие в РФ предельно допустимые концентрации тяжелых металлов в пищевых продуктах и продовольственном сырье были разработаны на основании анализа современных законодательных актов по гигиеническому нормированию, международных рекомендаций ФАО/ВОЗ, нормативов, принятых в отдельных странах. При этом были учтены данные о естественном содержании элементов в пищевых продуктах и результаты токсикологических и гигиенических исследований чужеродных веществ, проведенных в научно-исследовательских учреждениях страны, материалы по токсикологии и гигиеническому нормированию химических элементов в различных объектах природной среды. Допустимое (не более) количество Hg в живой, охлажденной и мороженой пресноводной мирной рыбе – 0.3 мг/кг сырой массы, пресноводной хищной – 0.6, морской рыбе – 0.5; тунце, меч-рыбе и белуге – 1.0; рыбных консервах и пресервах – 0.3, в икре и молоках рыб и продуктах из них – 0.2, печени рыб и продуктах из нее – 0.5 [СанПиН 2.3.2. 1078-01 (SanPiN 2.3.2. 1078-01)].

Зарубежные нормативы по содержанию Hg в рыбной продукции и рекомендованным объемам ее использования в рационе питания населения варьируют в незначительных пределах. Агентство по охране окружающей среды США (US EPA) в июне 2020 г. (обновленный документ 2001 г.) рекомендовало исключить из ежедневного питания любую рыбу с концентрацией Hg в мышцах >0.3 мг/кг (порция продукта – 175 г/день¹). На тот же период максимальные уровни содержания Hg в рыбе по данным² Европейского Союза (ЕС) составили 0.3, 0.5 и 1.1 мг/кг, в зависимости от видовой принадлежности рыбы, трофического статуса (хищная – мирная) и места обитания (морская – пресноводная). В некоторых европейских странах ограничений по потреблению рыбы с повышенным содержанием Hg нет (Венгрия, Люксембург, Словакия) или их только собираются ввести³ (Испания). Однако в большинстве стран Европы людям, относящимся к группам риска (в основном, беременным и кормящим матерям, детям дошкольного возраста, реже – детям до 16 лет, взрослым репродуктивного возраста), рекомендовано не употреблять более 100–170 г определенных видов рыб в неделю (Великобритания, Дания, Франция, Чехия). В Финляндии лосося, сельдь или щуку, выловленных в Балтийском море и во внутренних водоемах – либо избегать, либо включать в пищевой рацион не более одного-двух раз в месяц⁴.

Доля рыб с концентрацией Hg >0.30 мг/кг, среди всех исследованных в Ярославской области составила 26%, с концентрацией >0.60 мг/кг – 11%. Ртуть в концентрациях, превышающих предельно допустимые уровни для рыб конкретной трофической специализации, накапливали 0.3% пресноводных мирных особей и 16% хищных (преимущественно из водохранилищ и малых кислотных озер Дарвинского заповедника).

По расчетам Агентства по охране окружающей среды США, учитывающим индивидуальную массу тела, максимально допустимое количество Hg в рыбе при заданном уровне ее потребления населением составляет: для детей 2–5 лет – <0.17 мг/кг, 6–10 лет – <0.21 мг/кг и взрослых – <0.33 мг/кг. По всем группам водоемов Ярославской области и

¹ <https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria-human-health-criteria-table>

² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02006R1881-20220701>

³ https://www.env-health.org/IMG/pdf/5-Mercury_and_Fish_Consumption.pdf

⁴ https://www.env-health.org/IMG/pdf/5-Mercury_and_Fish_Consumption.pdf

прилегающих территорий, а также исследованным видам рыб доля особей, содержащих Hg в превышающих максимально допустимые уровни для указанных выше возрастных групп населения, составила 36, 32 и 24%, соответственно. Из них 4.4, 2.2 и 0.3% – исследованных мирных рыб и 51.3, 46.3 и 35.2% – хищных.

Доля рыб с содержанием Hg >0.3 мг/кг (25%, по нормативам РФ для нехищных пресноводных видов рыб), которых рекомендовано исключить из употребления населением Ярославской области согласно санитарно-гигиеническим требованиям, фактически совпадает с рекомендациями ВОЗ/ФАО и US EPA для взрослого населения (24% исследованных видов рыб с содержанием металла >0.33 мг/кг). Т.е. применительно к рациону взрослого населения, ограничение потребления рыбы и рыбопродуктов, содержащих Hg, соответствует рекомендациям ФАО/ВОЗ, US EPA и Европейского агентства по безопасности продуктов питания. Для рациона детей дошкольного и школьного возраста нормы по потреблению безопасных для здоровья объемов (порций) рыбы в РФ не определены.

Аналогичные исследования на двух видах рыб – плотве и окуне – из разных водоемов (водохранилища, озера и реки) Вологодской области, соседствующей с Ярославской, дали сходные результаты [Ivanova et al., 2022]. Концентрации Hg в мышцах плотвы и окуня из водоемов Вологодской области варьировали в пределах 0.01–1.50 мг/кг, Ярославской – 0.0–1.44. Окунь накапливал ртути больше, чем плотва, и содержание металла положительно коррелировало с массой рыб. Для употребления в пищу взрослым населением Вологодской области было не рекомендовано 4% исследованных экземпляров плотвы и более 30% окуня (детьми дошкольного и школьного возраста – 18–60%), Ярославской – 1% и 39%, соответственно (детьми – 10–72%).

По нашим и приводимым в статье Е.С. Ивановой данным повышенные уровни накопления Hg в рыбе отмечены в целом по водоемам Вологодской области, для кислотных озер Дарвинского заповедника и Рыбинского водохранилища [Ivanova et al., 2022].

Запасы поверхностных вод Вологодской области богаче, чем Ярославской. Это касается количества и общих площадей водоемов (водохранилища и озера), водотоков (реки и ручьи), болот; а также степени заболоченности водосборных бассейнов водоемов разных размеров и водности.

Основными рыбохозяйственными водоемами на территории Ярославской области

являются: три водохранилища – Рыбинское (площадь в пределах области 3.2 тыс. км²), Горьковское (0.2 тыс. км²) и Угличское (0.1 тыс. км²); 83 озера общей площадью 127 км², преимущественно малых (кроме озер Неро и Плещеево), а также реки: 4.3 тыс. водотоков общей протяженностью 19 тыс. км. [Доклад о состоянии..., 2019 (Doklad o sostoyanii..., 2019)]. Болота занимают 3% общей территории области, 22 из них имеют площадь более 10 км². Распределение болот по территории области неравномерно, от 1 до 15%. Наиболее заболоченными (местами ≤15%) следует считать северную, северо-западную и южную группы административных районов, где сосредоточены самые крупные в области болотные массивы и их системы. Особенно велика заболоченность вокруг Рыбинского водохранилища, достигающая 20%.

На территории Вологодской области имеется 6 крупных водохранилищ: Белоусовское, Вытегорское, Новинкинское, Ковжское, Шекснинское, включая оз. Белое и часть акватории Рыбинского водохранилища [Доклад о состоянии..., 2021 (Doklad o sostoyanii..., 2021)]. А также 20 тыс. водотоков, общей протяженностью 70 тыс. км, и более 5 тыс. озер. Область занимает одно из первых мест на европейской территории России по числу и площади торфяных болот. Торфяные болота и заболоченные земли (слой торфа менее 0.3 м) на территории Вологодской области занимают около 25 тыс. км², составляя 17% ее площади. Болота в Вологодской области распределены по территории крайне неравномерно, занимая в отдельных районах от 180 до 3669 км² или 2–40% их территории [Филоненко, Филиппов, 2013 (Filonenko, Filippov, 2013)].

Факторы, повышающие миграционные свойства Hg и ее биодоступность, – гидрологические и гидрохимические особенности и размеры водосборных бассейнов водоемов, высокая степень их заболоченности [Haines et al., 1992; Greenfield et al., 2001]. Самые высокие концентрации Hg отмечены в рыбе из малых кислотных озер (pH ≤ 5) Дарвинского заповедника, ниже – Рыбинского водохранилища, с относительно высокой заболоченностью водосборного бассейна (около 20%). Самые низкие – в рыбе из озер Неро и Плещеево, расположенных на юго-западе Ярославской области с весьма низкой густотой речной сети и степенью заболоченности территории [Доклад о состоянии..., 2017 (Doklad o sostoyanii..., 2017)].

Последствия воздействия ртути на здоровье представляют серьезную угрозу для экосистем и благосостояния людей во всем мире

[WHO, 2017]. Непосредственно у жителей Вологодской области ранее была установлена связь увеличения содержания Hg в волосах с патологическими изменениями таких показателей здоровья, как результаты клинического анализа крови, течение ферментативных реакций и реакций окислительного стресса [Шува-

лова и др., 2018 (Shuvalova et al., 2018); Шувалова и др., 2021 (Shuvalova et al., 2021)]. Отмечено негативное влияние на сердечно-сосудистую систему [Ivanova et al., 2021]. В Ярославской области подобных исследований не проводилось.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пределы допустимого содержания ртути в рыбе и рыбной продукции, установленные в РФ, соответствуют или близки к действующим нормативам, принятым в странах Европейского сообщества, США и рекомендациям ВОЗ. В некоторых странах (Великобритания, Дания, Финляндия, Франция, Чехия) специальное, более строгое, нормирование содержания ртути в рыбе и рыбных продуктов распространяется на детей, беременных и кормящих женщин, взрослых репродуктивного возраста. В России не существует детализации регламента по возрастным группам и группам риска.

У более 99% проанализированных представителей мирных видов рыб из всех водоемов Ярославской области и 84% хищных содержание ртути в мышцах соответствует национальным требованиям: 0.3 мг/кг – для мирных видов, 0.6 мг/кг – для хищных. Максимальное количество (39%) представителей хищных видов рыб с превышением содержания ртути в мышцах отмечено в малых озерах

с заболоченным водосборным бассейном. Реже (5%) такая рыба встречается в водохранилищах. В средних по величине озерах хищная рыба с повышенным уровнем содержания ртути не зарегистрирована.

В целях реальной оценки соответствия содержания Hg в рыбной продукции, доступной населению области, санитарно-гигиеническим нормативам РФ, а также снижения негативного воздействия Hg на здоровье человека и повышения качества общественного здравоохранения, необходимо:

- получение дополнительных данных о концентрации Hg в объектах промыслового и спортивного рыболовства из водоемов с разными типологическими и гидрохимическими особенностями;

- просвещение населения в вопросах здоровья и информирование о рисках, связанных с частым употреблением в пищу рыбы с повышенным содержанием металла.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 121050500046-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисов М.Я. Рыбы Вологодской области: справочное издание. Череповец: Порт-Апрель, 2019. 127 с.
- Горбунов А.В., Ляпунов С.М., Окина О.И., Шешуков В.С. Биоаккумуляция ртути в тканях пресноводных рыб // Экология человека. 2018. № 11. С. 26–31. DOI: 10.33396/1728-0869-2018-11-26-31
- Горбунов А.В., Ляпунов С.М., Окина О.И., Шешуков В.С. Оценка поступления малых доз ртути в организм человека с продуктами питания // Экология человека. 2017. № 10. С. 16–20. DOI: 10.33396/1728-0869-2017-10-16-20
- Горбунов А.В., Ермолаев Б.В., Ляпунов С.М. Оценка поступления ртути от потребления рыбы и морепродуктов в России // Науки о пищевых продуктах и питании. 2016. № 7. С. 516–523. DOI: 10.33396/1728-0869-2017-10-16-20
- Гремячих В.А., Ложкина Р.А., Комов В.Т. Пространственно-временная вариабельность содержания ртути в речном окуне *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 (Perciformes: Percidae) Рыбинского водохранилища на рубеже XX–XXI веков // Трансформация экосистем. 2019. Т. 2. № 2 (4). С. 85–95. DOI: 10.23859/estr-180816
- Гремячих В., Комов В., Селюков А. Содержание ртути в мышечной ткани окуня (*Perca fluviatilis* L.) из озер Западной Сибири // Экологический мониторинг и биоразнообразие. 2013. Т. 1. С. 44–46.
- Доклад о состоянии и охране окружающей среды Вологодской области в 2020 г. / Правительство Вологодской области. Отв. ред. Банников Д.А. Вологда: Изд-во Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Вологодской области. 2021. 273 с.
- Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Ярославской области в 2015–2016 гг. / Департамент охраны окружающей среды и природопользования Ярославской области. Ярославль. Изд-во “Кадастр”. 2017. 250 с.
- Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Ярославской области в 2017 г. / Департамент охраны окружающей среды и природопользования Ярославской области. Ярославль. Изд-во “Кадастр”. 2019. 232 с.
- Иванов П.В. Классификация озер мира по величине и по их средней глубине // Бюллетень ЛГУ. Л., 1948. № 20. С. 29–36.
- Комов В.Т., Гремячих В.А., Удоденко Ю.Г., Щедрова Е.В., Елизаров М.Е. Ртуть в абиотических и биотических компонентах водных и наземных экосистем поселка городского типа на берегу Рыбинского водохранилища // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2017. Вып. 77 (80). С. 34–56. DOI: 10.24411/0320-3557-2017-10003

- Комов В.Т., Пронин Н.М., Мэндсайхан Б. Содержание ртути в мышцах рыб реки Селенга и озер ее бассейна (Россия) // Биология внутренних вод. 2014. № 2. С.89–96. DOI: 10.7868/S0320965214020053
- Комов В.Т., Степанова И.К., Гремячих В.А. Содержание ртути в мышцах рыб из водоемов Северо-Запада России: причины интенсивного накопления и оценка негативного эффекта на состояние здоровья людей // Актуальные проблемы водной токсикологии: сб. тез. докл. Борок, 2004. С. 99–123.
- Комов В.Т., Степанова И.К. Ртутное загрязнение // Экологические проблемы Верхней Волги. Ярославль: Изд-во ЯГТУ. 2001. С. 239–243.
- Немова Н.Н., Лысенко Л.А., Мещерякова О.В., Комов В.Т. Ртуть в рыбе: Биохимическая индикация // Биосфера. 2014. Т. 6. № 2. С. 176–186.
- РОССТАТ. Федеральная служба государственной статистики “Потребление продуктов питания в домашних хозяйствах в 2020 году”. 2021. <https://rosstat.gov.ru/folder/11110/document/13292/>.
- СанПиН 2.3.2.1078-01 от 14 ноября 2001 г. № 36. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. 2001. 269 с.
- СанПин 2.4.1.3049-13 от 15 мая 2013 г. №26 “Санитарно-эпидемиологические требования к устройству, содержанию и организации режима работы дошкольных образовательных организаций” https://www.rospotrebnadzor.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=3511.
- СанПиН 2.4.5.2409-08 от 23 июля 2008 г. № 45. “Санитарно-эпидемиологические требования к организации питания обучающихся в общеобразовательных учреждениях, учреждениях начального и среднего профессионального образования”. <http://71.rospotrebnadzor.ru/content/674/52931/>.
- Степанова И.К., Комов В.Т. Накопление ртути в рыбе из водоемов Вологодской области // Экология. 1997. Т. 28. № 4. С. 295–299.
- Сульдина Т.И. Содержание тяжелых металлов в продуктах питания и их влияние на организм // Рациональное питание, пищевые добавки и биостимуляторы. 2016. № 1. С. 136–140.
- Филоненко И.В., Филиппов Д.А. Оценка площади болот Вологодской области // Труды Инсторфа. 2013. № 7 (60). С. 3–11.
- Шувалова О.П., Иванова Е.С., Комов В.Т. Потребление рыбы, содержание ртути в волосах и риск развития сердечно-сосудистых заболеваний у жителей Вологодской области (северо-запад России) // Вестник новых медицинских технологий. 2021. № 4. С. 132–137. DOI: 10.24412/2075-4094-2021-4-3-9
- Шувалова О.П., Иванова Е.С., Комов В.Т. Влияние накопления ртути на состояние здоровья женщин репродуктивного возраста // Здоровье населения и среда обитания. 2018. № 11 (308). С. 36–39. DOI: 10.35627/2219-5238/2019-308-11-36-39
- Arantes F.P., Savassi L.A., Santos H.B., Gomes M.V.T., Bazzoli N. Bioaccumulation of mercury, cadmium, zinc, chromium, and lead in muscle, liver, and spleen tissues of a large commercially valuable catfish species from Brazil // An Acad Bras Ciênc. 2016. P. 137–147. DOI: 10.1590/0001-3765201620140434.
- Bridges K.N., Soulen B.K., Overturf C.L., Drevnick P.E., Roberts A.P. Embryotoxicity of maternally transferred methylmercury to fathead minnows (*Pimephales promelas*) // Environ. Toxicol. Chem. 2016. Vol. 35. P. 1436–1441. DOI: 10.1002/etc.3282
- COT / Updated cot statement on a survey of mercury in fish and shellfish / Committee on toxicity of chemicals in food consumer products and the environment. 2003. 19 pp.
- Crowe W., Allsopp P.J., Watson G.E. et al. Mercury as an environmental stimulus in the development of autoimmunity – A systematic review // Autoimmunity Reviews. 2017. Vol. 16. P. 72–80. DOI:10.1016/j.autrev.2016.09.020.
- Depew D.C., Basu N., Burgess N.M. et al. Toxicity of dietary methylmercury to fish: derivation of ecologically meaningful threshold concentrations // Environ. Toxicol. Chem. 2012. Vol. 31. № 7. P. 1536–1547. DOI: 10.1002/etc.1859.
- Driscoll C.T., Mason R.P., Chan H.M. et al. Mercury as a global pollutant: sources, pathways, and effects // Environ. Sci. Technol. 2013. Vol. 47. № 10. P. 4967–4983. DOI: 10.1021/es305071v.
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM); Scientific Opinion on the risk for public health related to the presence of mercury and methylmercury in food. EFSA Journal. 2012. 10(12):2985. 241 p. DOI: 10.2903/j.efsa.2012.2985.
- FAO. FAO yearbook of Fishery and Aquaculture Statistics 2017 / FAO annuaire. Retrieved November 10, 2020 from: <http://www.fao.org/3/ca5495t/CA5495T.pdf>.
- Grandjean P., Weihe P., Burse V.W. et al. Neurobehavioral deficits associated with PCB in 7-year-old children prenatally exposed to seafood neurotoxicants // Neurotoxicology and Teratolog. 2001. Vol. 23. P. № 4. 305–317. DOI: 10.1016/S0892-0362(01)00155-6.
- Greenfield B.K., Hrabik T.R., Harvey C.J., Carpenter S.R. Predicting mercury levels in yellow perch: use of water chemistry, trophic ecology, and spatial traits. // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 2001. Vol. 58. P. 1419–1429.
- Haines T.A., Komov V.T., Jagoe C.H. Lake acidity and mercury content of fish in Darwin National Reserve, Russia // Environ. Pollut. 1992. Vol. 78. № 1–3. P. 107–112. DOI: 10.1016/0269-7491(92)90017-5.
- Hawley D.M., Hallinger K.K., Cristol D.A. Compromised immune competence in free-living tree swallows exposed to mercury // Ecotoxicology. 2009. Vol. 18. P. 499–503. DOI: 10.1007/s10646-009-0307-4.
- Houston M.C. Role of Mercury Toxicity in Hypertension, Cardiovascular Disease, and Stroke // J. Clinical Hypertens. 2011. Vol. 13. № 8. P. 621–628. DOI: 10.1111/j.1751-7176.2011.00489.x.
- Hui L.L., Chan M.H.M., Lam H.S. et al. Impact of fetal and childhood mercury exposure on immune status in children // Environ. Res. 2016. Vol. 144. Part A. P. 66–72. DOI: 10.1016/j.envres.2015.11.005.

- Ivanova E.S., Shuvalova O.P., Eltsova L.S. et al. 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*. 2021. Vol. 43. P. 4589–4599. DOI: 10.1007/s10653-021-00939-6.
- 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 // *Environ Geochem Health*. 2022. DOI: 10.1007/s10653-022-01254-4.
- Julvez J., Smith G.D., Golding J. et al. Prenatal methylmercury exposure and genetic predisposition to cognitive deficit at age 8 years // *Epidemiology* (Cambridge, Mass.). 2013. Vol. 24. № 5. P. 643–650. DOI: 10.1097/EDE.0b013e31829d5e93.
- Kalkan H., Şişman T., Kılıç D. Assessment of heavy metal bioaccumulation in some tissues of *Leuciscus cephalus* from Karasu River, Erzurum-Turkey // *Austin J. Environ. Toxicol.* 2015. Vol. 1. № 1. P. 1–6. DOI: 10.1007/s10311-018-0734-7
- Kruzikova, K., Kensova, R., Sedlackova, L. et al. The correlation between fish mercury liver/muscle ratio and high and low levels of mercury contamination in Czech localities // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2013. Vol. 8. P. 45–56.
- Landler L., Painter M.S., Coe B.H. et al. High levels of maternally transferred mercury disrupt magnetic responses of snapping turtle hatchlings (*Chelydra serpentina*) // *Environ. Pollut.* 2017. Vol. 228. P. 19–25. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.04.050.
- Lewis C.A., Cristol D.A., Swaddle J.P. et al. Decreased immune response in zebra finches exposed to sublethal doses of mercury // *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2013. Vol. 64. P. 327–336. DOI: 10.1007/s00244-012-9830-z
- Li P., Zhang J., Xie H. et al. Heavy metal bioaccumulation and health hazard assessment for three fish species from Nansi Lake, China // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2015. Vol. 94. P. 431–436. DOI: 10.1007/s00128-015-1475-y.
- Luczynska J., Paszczyk B., Nowosad J., Luczynski M.J. 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*. 2017. Vol. 14. P. 1120–1136. DOI: 10.3390/ijerph14101120.
- Marrugo-Negrete J., Verbel J. O., Ceballos E. L., Benitez L. N. Total mercury and methylmercury concentrations in fish from the Mojana region of Colombia // *Environmental geochemistry and health*. 2008. Vol. 30. № 1. P. 21–30. DOI: 10.1007/s10653-007-9104-2.
- Milanov D.R., Krstić M., Marković R. et al. Analysis of heavy metals concentration in tissues of three different fish species included in human diet from Danube River // *Acta Vet* 2016. Vol. 66. P. 89–102. DOI: 10.1515/acve-2016-0007.
- Myers G.J., Davidson P.W., Strain J.J. Nutrient and methyl mercury exposure from consuming fish // *The Journal of nutrition*. 2007. Vol. 137. № 12. P. 2805–2808. DOI: 10.1093/jn/137.12.2805.
- Nikolić D., Skorić S., Janković S. et al. Age-specific accumulation of toxic metal(loid)s in northern pike (*Esox lucius*) juveniles // *Environ Monit Assess.* 2021. Vol. 193. P. 229–238. DOI: 10.1007/s10661-021-09004-2.
- Pal M., Ghosh M. Assay of biochemical compositions of two Indian fresh water eel with special emphasis on accumulation of toxic heavy metals // *J. Aqua Food Prod. Technol.* 2013. Vol. 22. P. 27–35. DOI: 10.1080/10498850.2011.622070.
- Rice K.M., Walker E.M., Wu M., Gillette C., Blough E.R. Environmental mercury and its toxic effects // *Journal of Preventive Medicine and Public Health*. 2014. Vol. 47. № 2. P. 74–83. DOI: 10.3961/jpmph.2014.47.2.74
- Scheuhammer A.M., Sandheinrich M.B. Recent advances in the toxicology of methylmercury in wildlife // *Ecotoxicology*. 2008. Vol. 17. P. 67–68. DOI: 10.1007/s10646-007-0186-5.
- Siraj M., Khisroon M., Khan A. Bioaccumulation of heavy metals in different organs of Wallago attu from River Kabul Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan // *Biol. Trace Element Res.* 2016. Vol. 172. P. 242–250. DOI: 10.1007/s12011-015-0572-4.
- Sokal R.R., Rohlf F.J. *Biometry: the principals and practice of statistics in biological research*. New York, USA: W.H. Freeman and Co. 1995. 887 p.
- Soltani N., Marengo M., Keshavarzi B. et al. Occurrence of trace elements (TEs) in seafood from the North Persian Gulf: Implications for human health // *Journal of Food Composition and Analysis*. 2021. Vol. 97. 14 p. DOI: 10.1016/j.jfca.2020.103754.
- Sonesten L. Fish mercury levels in lakes--adjusting for Hg and fish-size covariation // *Environmental pollution*. 2003. Vol. 125. № 2. P. 255–265. DOI: 10.1016/s0269-7491(03)00051-4.
- Tchounwou P.B., Ayensu W.K., Ninashvili N., Sutton D. Environmental exposure to mercury and its toxicopathologic implications for public health // *Environ. Technol.* 2003. Vol. 18. № 3. P. 149–175. DOI: 10.1002/tox.10116
- UNEP (2011). Executive summary of the document on guidance for identifying populations at risk from mercury exposure. Retrieved November 10, 2020 from: <http://www.mercuryconvention.org/Convention/History/INC2/tabid/3435/-language/en-US/Default.aspx>
- UNEP (2013). “Minamata Convention Agreed by Nations”. Retrieved 5 January 2020. <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/minamata-convention-agreed-nationssee>.
- United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA): *Guidance for Assessing Chemical Contaminant Data for Use in Fish Advisories, Volume 1: Fish Sampling and Analysis Third Edition*. (2000). Retrieved November 10, 2020 from: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/volume1.pdf>
- Valeraa B., Dewailly E., Poirier P. Association between methylmercury and cardiovascular risk factors in a native population of Quebec (Canada): a retrospective evaluation // *Environ. Res.* 2013. Vol. 120. P. 102–108. DOI: 10.1016/j.envres.2012.08.002.

- WHO (2007). Exposure to Mercury: a Major Public Health Concern. Retrieved October 26, 2020. from: <https://www.who.int/ipcs/features/mercury.pdf>.
- WHO (2017). Fact sheets / Mercury and health. Retrieved November 10, 2020. <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>.
- Yi Y-J, Zhang S-H. Heavy metal (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) concentrations in seven fish species in relation to fish size and location along the Yangtze River // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2012. Vol. 19. P. 3989–3996. DOI: 10.1007/s11356-012-0840-1.

REFERENCES

- Arantes F.P., Savassi L.A., Santos H.B., Gomes M.V.T., Bazzoli N. Bioaccumulation of mercury, cadmium, zinc, chromium, and lead in muscle, liver, and spleen tissues of a large commercially valuable catfish species from Brazil. *An Acad Bras Ciênc.* 2016, pp. 137–147. doi: 10.1590/0001-3765201620140434
- Borisov M.Ya. Fish of the Vologda region: reference edition. Cherepovets, Port-April, 2019, 127 p. (In Russian).
- Bridges K.N., Soulen B.K., Overturf C.L. et al. Embryotoxicity of maternally transferred methylmercury to fathead minnows (*Pimephales promelas*). *Environ. Toxicol. Chem.*, 2016, vol. 35, pp. 1436–1441. doi: 10.1002/etc.3282
- COT. Updated cot statement on a survey of mercury in fish and shellfish. Committee on toxicity of chemicals in food consumer products and the environment. 2003. 19 pp.
- Crowe W., Allsopp P.J., Watson G.E. et al. Mercury as an environmental stimulus in the development of autoimmunity – A systematic review. *Autoimmunity Reviews*, 2017, vol. 16, pp. 72–80. doi: 10.1016/j.autrev.2016.09.020
- Depew D.C., Basu N., Burgess N.M. et al. Toxicity of dietary methylmercury to fish: derivation of ecologically meaningful threshold concentrations. *Environ. Toxicol. Chem.*, 2012, vol. 31, no. 7, pp. 1536–1547. doi: 10.1002/etc.1859.
- Doklad o sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy Yaroslavskoj oblasti v 2015–2016 gg. [Report on the state and protection of the environment of the Yaroslavl region in 2015–2016]. Yaroslavl, Publishing House “Cadastre”, 2017. 250 p.
- Doklad o sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy Yaroslavskoj oblasti v 2017 g. [Report on the state and environmental protection of the Yaroslavl region in 2017]. Yaroslavl, Publishing House “Cadastre”. 2019. 232 p. (In Russian).
- Doklad o sostoyanii i ohrane okruzhayushchej sredy Vologodskoj oblasti v 2020 g. [Report on the state and protection of the environment of the Vologda Oblast in 2020]. Vologda, Publishing House of the Department of Natural Resources and Environmental Protection of the Vologda Oblast, 2021. 273 p.
- Driscoll C.T., Mason R.P., Chan H.M. et al. Mercury as a global pollutant: sources, pathways, and effects. *Environ. Sci. Technol.*, 2013, vol. 47, no. 10. pp. 4967–4983. doi: 10.1021/es305071v.
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM); Scientific Opinion on the risk for public health related to the presence of mercury and methylmercury in food. *EFSA Journal*, 2012, no. 10(12):2985. 241 p. doi: 10.2903/j.efsa.2012.2985.
- FAO. FAO yearbook of Fishery and Aquaculture Statistics 2017. FAO annuaire. Retrieved November 10, 2020 from: <http://www.fao.org/3/ca5495t/CA5495T.pdf>.
- Filonenko I.V., Filippov D.A. Assessment of the area of bogs of the Vologda oblast. *Instorf.*, 2013, vol. 7 (60), pp. 3–11. (In Russian).
- Gorbunov A.V., Ermolaev B.V., Lyapunov S.M. Assessment of mercury intake from fish and seafood consumption in Russia. *Science of Food and Nutrition*, 2016, no. 7, pp. 516–523. (In Russian).
- Gorbunov A.V., Lyapunov S.M., Okina O.I., Sheshukov V.S. Assessment of the intake of small doses of mercury into the human body with food. *Human ecology*, 2017, no. 10, pp. 16–20. (In Russian).
- Gorbunov A.V., Lyapunov S.M., Okina O.I., Sheshukov V.S. Bioaccumulation of mercury in freshwater fish tissues. *Human ecology*, 2018, no. 11, pp. 26–31. (In Russian).
- Government of the Vologda Region. Report on the state and environmental protection of the Vologda Region in 2020. Vologda, Publishing House of the Department of Natural Resources and Environmental Protection of the Vologda region, 2021. 273 p. (In Russian).
- Grandjean P., Weihe P., Burse V.W., Needham L.L., Hansen E.S., Heinzow B. and White R.F. Neurobehavioral deficits associated with PCB in 7-year-old children prenatally exposed to seafood neurotoxicants. *Neurotoxicology and Teratology*, 2001, vol. 23, no. 4, pp. 305–317. doi: 10.1016/s0892-0362(01)00155-6.
- Gremyachikh V., Komov V., Selyukov A. Mercury content in muscle tissue of perch (*Perca fluviatilis* L) from lakes of Western Siberia. *Environmental monitoring and biodiversity*, 2013, vol. 1, pp. 44–46. (In Russian).
- Gremyachikh V.A., Lozhkina R.A., Komov V.T. Spatiotemporal variability of mercury content in the river dip *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 (Perciformes: Percidae) of the Rybinsk reservoir at the turn of the XX-XXI centuries. *Transformation of ecosystems*, 2019, vol. 2, no. 2 (4), pp. 85–95. (In Russian).
- Greenfield B.K., Hrabik T.R., Harvey C.J., Carpenter S.R. Predicting mercury levels in yellow perch: use of water chemistry, trophic ecology, and spatial traits. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 2001, vol. 58, pp. 1419–1429.
- Haines T.A., Komov V.T., Jagoe C.H. Lake acidity and mercury content of fish in Darwin National Reserve, Russia. *Environ. Pollut.*, 1992, vol. 78, no. 1–3, pp. 107–112. doi: 10.1016/0269-7491(92)90017-5
- Hawley D.M., Hallinger K.K., Cristol D.A. Compromised immune competence in free-living tree swallows exposed to mercury. *Ecotoxicology*, 2009, vol. 18, pp. 499–503. doi: 10.1007/s10646-009-0307-4

- Houston M.C. Role of Mercury Toxicity in Hypertension, Cardiovascular Disease, and Stroke. *J. Clinical Hypertens*, 2011, vol. 13, no. 8, pp. 621–628. doi: 10.1111/j.1751-7176.2011.00489.x
- Hui L.L., Chan M.H.M., Lam H.S. et al. Impact of fetal and childhood mercury exposure on immune status in children. *Environ. Res.*, 2016, vol. 144, part A, pp. 66–72. doi: 10.1016/j.envres.2015.11.005
- Ivanov P.V. Classification of lakes of the world by size and by their average depth. *Bulletin of LSU*, 1948, no. 20, pp. 29–36. (In Russian).
- 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. *Environ Geochem Health*, 2022. doi: 10.1007/s10653-022-01254-4
- Ivanova E.S., Shuvalova O.P., Eltsova L. S. et al. 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*, 2021, vol. 43, pp. 4589–4599. doi: 10.1007/s10653-021-00939-6.
- Julvez J., Smith G. D., Golding J., Ring S., Pourcain B. S., Gonzalez J. R. and Grandjean P. Prenatal methylmercury exposure and genetic predisposition to cognitive deficit at age 8 years. *Epidemiology*, 2013, vol. 24, no. 5, pp. 643–650. doi: 10.1097/EDE.0b013e31829d5c93.
- Kalkan H., Şişman T., Kılıç D. Assessment of heavy metal bioaccumulation in some tissues of *Leuciscus cephalus* from Karasu River, Erzurum-Turkey. *Austin J Environ Toxicol.*, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 1–6.
- Komov V.T., Gremyachikh V.A., Udodenko Yu.G. et al. Mercury in abiotic and biotic components of aquatic and terrestrial ecosystems of an urban-type settlement on the shore of the Rybinsk reservoir. *Proceedings of the I.D. Papanin Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences*, 2017, iss. 77 (80), pp. 34–56. (In Russian).
- Komov V.T., Pronin N.M., Mandsaikhan B. Mercury content in fish muscles of the Selenga River and lakes of its basin (Russia). *Inland Waters Biology*, 2014, no. 2, pp. 89–96. doi.org/10.1134/S1995082914020059.
- Komov V.T., Stepanova I.K. Environmental problems of the Upper Volga. Rtutnoe zagryaznenie. [Mercury pollution]. Yaroslavl, Publishing house of YAGTU, 2001, pp. 239–243. (In Russian).
- Komov V.T., Stepanova I.K., Gremyachikh V.A. Actual problems of aquatic toxicology. Soderzhanie rtuti v myshchah ryb iz vodoemov Severo-Zapada Rossii: prichiny intensivnogo nakopleniya i ochenka negativnogo efekta na sostoyanie zdorov'ya lyudej [The mercury content in the muscles of fish from the reservoirs of the North-West of Russia: the causes of intensive accumulation and assessment of the negative effect on human health]. Borok, I.D. Papanin Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences, 2004, pp. 99–123. (In Russian).
- Kruzikova K., Kensova R., Sedlackova L. et al. The correlation between fish mercury liver/muscle ratio and high and low levels of mercury contamination in Czech localities. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2013, vol. 8, pp. 45–56.
- Landler L., Painter M.S., Coe B.H. et al. High levels of maternally transferred mercury disrupt magnetic responses of snapping turtle hatchlings (*Chelydra serpentina*). *Environ. Pollut.*, 2017, vol. 228, pp. 19–25. doi: 10.1016/j.envpol.2017.04.050.
- Lewis C.A., Cristol D.A., Swaddle J.P. et al. Decreased immune response in zebra finches exposed to sublethal doses of mercury. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 2013, vol. 64, pp. 327–336. doi: 10.1007/s00244-012-9830-z.
- Li P., Zhang J., Xie H. et al. Heavy metal bioaccumulation and health hazard assessment for three fish species from Nansi Lake, China. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 2015, vol. 94, pp. 431–436. doi: 10.1007/s00128-015-1475-y.
- Luczynska J., Paszczyk B., Nowosad J., Luczynski M.J. 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*, 2017, vol. 14, pp. 1120–1136. doi: 10.3390/ijerph14101120
- Marrugo-Negrete J., Verbel J.O., Ceballos E.L., Benitez L.N. Total mercury and methylmercury concentrations in fish from the Mojana region of Colombia. *Environmental geochemistry and health*, 2008, vol. 30, no. 1, pp. 21–30. doi: 10.1007/s10653-007-9104-2
- Milanov D.R., Krstić M., Markovic R. Et al. Analysis of heavy metals concentration in tissues of three different fish species included in human diet from Danube River. *Acta Vet.*, 2016, vol. 66, pp. 89–102. doi: 10.1515/acve-2016-0007
- Myers G.J., Davidson P.W., Strain J.J. Nutrient and methyl mercury exposure from consuming fish. *The Journal of nutrition*, 2007, vol. 137, no. 12, pp. 2805–2808. doi: 10.1093/jn/137.12.2805
- Nemova N.N., Lysenko L.A., Meshcheryakova O.V., Komov V.T. Mercury in fish: Biochemical indication. *Biosphere*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 176–186. (In Russian).
- Nikolić D., Skorić S., Janković S. et al. Age-specific accumulation of toxic metal(loid)s in northern pike (*Esox lucius*) juveniles. *Environ. Monit. Assess.*, 2021, vol. 193, pp. 229–238. doi: 10.1007/s10661-021-09004-2
- Pal M., Ghosh M. Assay of biochemical compositions of two Indian fresh water eel with special emphasis on accumulation of toxic heavy metals. *J. Aqua Food Prod. Technol.*, 2013, vol. 22, pp. 27–35. doi: 10.1080/10498850.2011.622070
- Rice K.M., Walker E.M., Wu M., Gillette C., Blough E.R. Environmental mercury and its toxic effects. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, 2014, vol. 47, no. 2, pp. 74–83. doi: 10.3961/jpmph.2014.47.2.74
- ROSSTAT. Federal State Statistics Service “Food Consumption in Households in 2020”. 2021. <https://rosstat.gov.ru/folder/11110/document/13292/> (In Russian).
- SanPiN 2.3.2.1078-01 dated November 14, 2001 No. 36. Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products. 2001. 269 p. (In Russian).

- SanPin 2.4.1.3049-13 dated May 15, 2013 No. 26 “Sanitary and epidemiological requirements for the device, maintenance and organization of the working hours of preschool educational organizations” https://www.rosпотребнадзор.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=3511 (In Russian).
- SanPiN 2.4.5.2409-08 dated July 23, 2008 No. 45. “Sanitary and epidemiological requirements for catering for students in general education institutions, institutions of primary and secondary vocational education”. <http://71.rosпотребнадзор.ru/content/674/52931/> (In Russian).
- Scheuhammer A.M., Sandheinrich M.B. Recent advances in the toxicology of methylmercury in wildlife. *Ecotoxicology*, 2008, vol. 17, pp. 67–68. doi: 10.1007/s10646-007-0186-5
- Shuvalova O.P., Ivanova E.S., Komov V.T. Fish consumption, mercury content in hair and the risk of developing cardiovascular diseases among residents of the Vologda Oblast (North-West Russia). *Vestnik novyh medicinskih tekhnologij*, 2021, no. 4, pp. 132–137. (In Russian).
- Shuvalova O.P., Ivanova E.S., Komov V.T. The influence of mercury accumulation on the health of women of reproductive age. *Population health and habitat*, 2018, no. 11 (308), pp. 36–39. (In Russian).
- Siraj M., Khisroon M., Khan A. Bioaccumulation of heavy metals in different organs of Wallago attu from River Kabul Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Biol. Trace Element Res.*, 2016, vol. 172, pp. 242–250. doi: 10.1007/s12011-015-0572-4
- Sokal R.R., Rohlf F.J. Biometry: the principals and practice of statistics in biological research. New York, USA, W.H. Freeman and Co, 1995. 887 p.
- Soltani N., Marengo M., Keshavarzi B. et al. Occurrence of trace elements (TEs) in seafood from the North Persian Gulf: Implications for human health. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2021, vol. 97, 14 p. doi: 10.1016/j.jfca.2020.103754
- Sonesten L. Fish mercury levels in lakes--adjusting for Hg and fish-size covariation. *Environmental pollution*, 2003, vol. 125, no. 2, pp. 255–265. doi: 10.1016/s0269-7491(03)00051-4
- Stepanova I.K., Komov V.T. Accumulation of mercury in fish from reservoirs of the Vologda region. *Ecology*, 1997, vol. 28, no. 4, pp. 295–299. (In Russian).
- Suldina T.I. The content of heavy metals in food and their effects on the body. *Rational nutrition, nutritional supplements and biostimulants*, 2016, vol. 1, pp. 136–140. (In Russian).
- Tchounwou P.B., Ayensu W.K., Ninashvili N., Sutton D. Environmental exposure to mercury and its toxicopathologic implications for public health. *Environ. Technol.*, 2003, vol. 18, no. 3, pp. 149–175. doi: 10.1002/tox.10116
- UNEP (2011). Executive summary of the document on guidance for identifying populations at risk from mercury exposure. Retrieved November 10, 2020 from: <http://www.mercuryconvention.org/Convention/History/INC2/tabid/3435/language/en-US/Default.aspx>
- UNEP (2013). “Minamata Convention Agreed by Nations”. Retrieved 5 January 2020. <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/minamata-convention-agreed-nationssee>.
- United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA): Guidance for Assessing Chemical Contaminant Data for Use in Fish Advisories, Volume 1: Fish Sampling and Analysis Third Edition. (2000). Retrieved November 10, 2020 from: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/volume1.pdf>.
- Valeraa B., Dewailly E., Poirier P. Association between methylmercury and cardiovascular risk factors in a native population of Quebec (Canada): a retrospective evaluation. *Environ. Res.*, 2013, vol. 120, pp. 102–108. doi: 10.1016/j.envres.2012.08.002
- WHO (2007). Exposure to Mercury: a Major Public Health Concern. Retrieved October 26, 2020. from: <https://www.who.int/ipcs/features/mercury.pdf>. WHO (2017). Fact sheets / Mercury and health. Retrieved November 10, 2020. <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>.
- Yi Y.-J., Zhang S.-H. Heavy metal (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) concentrations in seven fish species in relation to fish size and location along the Yangtze River. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2012, vol. 19, pp. 3989–3996. doi: 10.1007/s11356-012-0840-1

MERCURY CONCENTRATIONS IN MUSCLES OF DIFFERENT FISH SPECIES FROM WATER BODIES OF YAROSLAVL REGION AND ADJACENT TERRITORIES

V. A. Gremyachikh*, R. A. Lozhkina**, D. E. Kotikov, V. T. Komov
Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences
152742 Borok, Russia, e-mail: *grva@ibiw.ru, **Lozhkina.roza@yandex.ru
Revised 10.09.2022

Mercury (Hg) and its compounds, which pose a health risk to the population not engaged in hazardous industries, enter the human body mainly with food items. First of all, these are seafood, fish and canned fish. In this study, the concentrations of Hg in the muscles of different fish species from the water bodies of the Yaroslavl province were determined. The average values of mercury content range from 0.03 to 0.41 mg/kg wet weight. The recorded levels of mercury accumulation correspond or are close to the previously obtained values in the muscles of fish from freshwater reservoirs of the European part of Russia and European states. The species-specificity of the Hg accumulation process, its dependence on trophic specialization and size-weight characteristics of fish, as well as on the type of reservoir were noted. The regulatory standards established in the Russian Federation for the mercury content in the muscles of non-predatory (<0.3 mg/kg w.w.) and predatory

(<0.6 mg/kg w.w.) fish species were exceeded in 0.3% and 16% of the studied non-predatory and predatory fish, respectively. Most specimens of predatory fish species with Hg concentrations in the muscles exceeding the accepted standards were recorded in small lakes with swampy catchment areas, less in reservoirs, and least of all – in medium-sized lakes. The maximum acceptable limits of mercury content in fish and fish products established in the Russian Federation correspond or are close to the current standards accepted in the countries of the European Community and the United States and WHO recommendations, although there is no detailed regulation by age groups and risk groups.

Keywords: fish, regulations for the Hg content in fish products, Yaroslavl province