








DOI 10.23859/estr-230920

EDN ONTMIZ

УДК 574.64+613.2

Научная статья

Оценка безопасности употребления в пищу рыбы из водоемов Вологодской области с различным содержанием ртути в мышечной ткани

М.Я. Борисов^{1*} , Е.С. Иванова² , Н.Ю. Тропин¹ ,
А.Е. Шилова¹ , Е.В. Угрюмова¹ , Д.Э. Баженова²

¹ Вологодский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ВологодНИРО»), 160012, Россия, г. Вологда, ул. Левичева, д. 5

² Череповецкий государственный университет, 162600, Россия, Вологодская обл., г. Череповец, пр. Луначарского, д. 5

*myaborisov@mail.ru

Аннотация. Содержание ртути в мышечной ткани рыб водных объектов Вологодской области варьирует в пределах от менее чем 0.001 до 2.492 мкг/г сырой массы. Минимальные средние значения отмечены для радужной форели и снетка (0.025 и 0.066 мкг/г), максимальные средние – для жереха и кильца (0.401 и 0.472 мкг/г). Установлено, что у 12.1% исследованных особей нехищных видов и 9.5% особей хищных видов рыб содержание ртути превышает нормативные уровни, действующие в РФ для этих групп видов (≥ 0.3 мкг/г и ≥ 0.6 мкг/г соответственно). Доля исследованной рыбы, употребление которой приведет к превышению допустимого еженедельного поступления ртути в организм (RfD согласно US EPA) составляет 50% для детей дошкольного возраста (2–5 лет), 37% для детей младшего школьного возраста (6–10 лет), 24% для детей среднего школьного возраста (11–15 лет) и 18% для взрослого населения.

Ключевые слова: пресные водоемы, нехищные рыбы, хищные рыбы, рекомендации по потреблению, расчет безопасных доз

Финансирование. Работа Е.С. Ивановой выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 23-24-00385, <https://rscf.ru/project/23-24-00385/>

Благодарности. Авторы благодарны всем сотрудникам Вологодского филиала ФГБНУ «ВНИРО», участвовавшим в сборе полевого материала.

ORCID:

М.Я. Борисов, <https://orcid.org/0000-0002-0406-0540>

Е.С. Иванова, <https://orcid.org/0000-0002-6976-1452>

Н.Ю. Тропин, <https://orcid.org/0000-0002-7152-0543>

А.Е. Шилова, <https://orcid.org/0009-0006-8255-6863>

Е.В. Угрюмова, <https://orcid.org/0009-0003-2020-5222>

Для цитирования: Борисов, М.Я. и др., 2023. Оценка безопасности употребления в пищу рыбы из водоемов Вологодской области с различным содержанием ртути в мышечной ткани. *Трансформация экосистем* 6 (4), 97–118. <https://doi.org/10.23859/estr-230920>

Поступила в редакцию: 20.09.2023

Принята к печати: 26.10.2023

Опубликована онлайн: 13.11.2023






DOI 10.23859/estr-230920

EDN ONTMIZ

UDC 574.64+613.2

Article

Assessing the consumptive safety of fish with different mercury content in its muscles (water bodies of Vologda Oblast as a case study)

Mikhail Ya. Borisov^{1*} , Elena S. Ivanova² , Nikolay Yu. Tropin¹ , Anastasia E. Shilova¹ , Elena V. Ugryumova¹ , Darya E. Bazhenova²

¹ Vologda Branch of FSBSI “VNIRO” (“VologodNIRO”), ul. Levicheva 5, Vologda, 160012 Russia

² Cherepovets State University, pr. Lunacharskogo 5, Cherepovets, Vologda Oblast, 162600 Russia

*myaborisov@mail.ru

Abstract. The mercury content in muscle tissues of fish from the water bodies of Vologda Oblast varied within 0.001–2.492 µg/g wet weight. The minimum average values were recorded for rainbow trout and smelt (0.025 and 0.066 µg/g), while the maximum average – for asp and smelt (0.401 and 0.472 µg/g). In 12.1% of the studied non-predatory and 9.5% of predatory fish specimens, mercury concentrations exceeded the RF standard levels established for these groups of species (≥ 0.3 µg/g and ≥ 0.6 µg/g, respectively). The proportion of the examined fish, the consumption of which would result in exceeding the permissible weekly mercury intake (RfD according to US EPA) made up 50% for preschool children (2–5 years), 37% for primary school children (6–10 years), 24 % for a secondary school age (11–15 years), and 18% for adults.

Keywords: freshwater bodies, non-predatory fish, predatory fish, consumption recommendations, calculation of safe doses

Funding. The study by E.S. Ivanova was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-24-00385, <https://rscf.ru/project/23-24-00385/>

Acknowledgements. The authors would thank all the employees of the Vologda Branch of FSBSI “VNIRO”, who participated in the collection of field material.

ORCID:

M.Ya. Borisov, <https://orcid.org/0000-0002-0406-0540>

E.S. Ivanova, <https://orcid.org/0000-0002-6976-1452>

N.Yu. Tropin, <https://orcid.org/0000-0002-7152-0543>

A.E. Shilova, <https://orcid.org/0009-0006-8255-6863>

E.V. Ugryumova, <https://orcid.org/0009-0003-2020-5222>

To cite this article: Borisov, M.Ya. et al., 2023. Assessing the consumptive safety of fish with different mercury content in its muscles (water bodies of Vologda Oblast as a case study). *Ecosystem Transformation* 6 (4), 97–118. <https://doi.org/10.23859/estr-230920>

Received: 20.09.2023

Accepted: 26.10.2023

Published online: 13.11.2023

Введение

Проблема ртутного загрязнения носит глобальный характер. В 2013 г. более 120 стран подписали Минаматскую конвенцию с целью защиты здоровья человека и окружающей среды от ртути и ее соединений¹. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) рассматривает ртуть в качестве одного из десяти основных химических элементов, представляющих значительную проблему для общественного здравоохранения². На протяжении второй половины XX в. ВОЗ разрабатывала и рекомендовала безопасные для здоровья человека значения концентраций ртути в различных биосубстратах, а также нормативные уровни содержания металла в продуктах питания и контрольные дозы потребления³. Установлено, что основным источником поступления ртути в организм людей служит рыба, употребляемая в пищу (Cottril et al., 2012). При этом более 90% общего содержания ртути в мышцах рыб находится в наиболее токсичной метилированной форме (Myers et al., 2007). Основная часть (более 95%) метилртути из употребляемой рыбы легко усваивается организмом через желудочно-кишечный тракт (Chouvelon et al., 2009). Содержание металла в организме человека возрастает с увеличением доли рыбы в еженедельном рационе. Накопление в организме человека ртути оказывает нейротоксическое воздействие, отрицательно влияет на сердечно-сосудистую систему, репродуктивную функцию и приводит к нарушению эмбрионального развития (Houston, 2011, Rice et al., 2014). Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (FAO), Европейское управление по безопасности пищевых продуктов (EFSA) и Агентство по охране окружающей среды США (EPA) рекомендуют оценивать безопасность рыбы и морепродуктов в рационе на основе расчета безопасной дозы ртути, попадающей в организм человека в течение определенного времени (RfD)⁴. В Российской Федерации регулирование алиментарного поступления ртути в организм человека основано на ограничении потребления продуктов, содержание соединений ртути в которых не превышает определенных значений⁵.

Рыболовство является одним из традиционных направлений деятельности населения Вологодской области, богатой разнообразными водными объектами (Борисов и др., 2019). По официальным данным, ежегодный вылов рыбы в реках и озерах региона в последнее десятилетие составляет около 2 тысяч тонн. В составе уловов отмечается до тридцати видов рыб. При этом наибольшее значение в структуре промышленного вылова имеют лещ, корюшка, плотва, чехонь, окунь, судак, а в любительских уловах – окунь, щука, судак, плотва, лещ и густера. Выловленная рыба не только потребляется местным населением, но и вывозится за пределы Вологодской области. Таким образом, традиционно частое питание рыбой из местных водоемов и водотоков может создавать риск накопления ртути в организме людей.

Цель работы – оценить безопасность употребления в пищу рыбы из водоемов Вологодской области с различным содержанием ртути в мышечной ткани.

¹ UNEP. Minamata Convention Agreed by Nations. Retrieved 19 January 2013. Электронный ресурс. URL: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/minamata-convention-agreed-nations> (дата обращения: 04.09.2023).

² WHO. Mercury and health, 2017. Электронный ресурс. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health> (дата обращения: 04.09.2023).

³ WHO. IPCS. Environmental health criteria 101: Methylmercury, 1993. World Health Organization, Geneva, 1993–2144.

⁴ UNEP. Executive summary of the document on guidance for identifying populations at risk from mercury exposure. Chiba, Japan, 24–28 January 2011.

⁵ СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов.

Материал и методы

В работе обобщены результаты исследований содержания ртути в мышечной ткани рыб из водоемов и водотоков Вологодской области с 2007 по 2023 гг. Исследованиями за этот период охвачено 98 разнотипных водных объектов на 112 участках во всех 26 муниципальных округах (районах), включая 38 рек, 50 озер, 6 водохранилищ, 3 пруда и 1 затопленный карьер (Рис. 1, Табл. 1). Рыбу ловили ставными жаберными сетями, плавными сетями, неводами, курляндками, тралом, спиннингом и удочками разных конструкций. После вылова каждый экземпляр рыб подвергался полному биологическому анализу с измерением промысловой длины и массы тела, определением пола, отбором чешуи, лучей плавников и отолитов для последующего определения возраста. Образцы мышц брали из средней части тела между боковой линией и спинным плавником, помещали их в полиэтиленовые пакеты и хранили при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Содержание ртути определено в мышцах 10720 экземпляров 34 видов и экологических форм рыб (Табл. 1). Все исследованные рыбы являются объектами аквакультуры, промышленного или любительского рыболовства, потребляются населением в качестве объекта питания и могут быть потенциальным источником поступления ртути в организм человека.

Содержание ртути в пробах определяли на ртутном анализаторе РА-915М с приставкой ПИРО (Люмэкс) атомно-абсорбционным методом пиролиза без предварительной пробоподготовки (Sholupov et al., 2004). Пробы массой 10–50 мг помещали на кварцевый дозатор и переносили в ячейку термолитиза для определения общего содержания ртути. Сжигание проб проводилось при температуре около $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1–2 минут. Каждую пробу анализировали в двукратной повторности. Точность аналитических методов измерения контролировали после 30 измерений с использованием сертифицированного биологического материала DORM-4 (с известным содержанием ртути 0.41 ± 0.055 мкг Hg/g) и DOLT-5 (с известным содержанием ртути 0.44 ± 0.18 мкг Hg/g).

Для оценки закономерностей накопления ртути сравнивали ее содержание у отдельных видов и трофических групп рыб, анализировали корреляционную связь между концентрацией ртути, длиной, массой и возрастом рыб. Названия видов приведены по изданию «Рыбы в заповедниках России» (2010). Группы рыб по трофической специализации (ихтиофаги, планктоихтиофаги, эврифаги, бентофаги, фитобентофаги, планктофаги) выделены согласно публикации Ю.В. Слынько и В.Г. Терещенко (2014) с некоторыми дополнениями с учетом характера питания рыб в водных объектах Вологодской области. Два вида карасей (золотой и серебряный), которые достоверно не отличаются по содержанию ртути, при статистическом анализе объединили в одну группу "карась". В связи со значимыми отличиями по содержанию ртути у ряпушки выделена крупная со смешанным питанием форма «килец», а у корюшки мелкая короткоцикловая преимущественно потребляющая зоопланктон – «снеток».

Статистический анализ результатов выполнен с использованием программы Past 4.0 (Hammer et al., 2001). Для оценки различий между содержанием ртути в мышечной ткани рыб разных трофических групп использовали непараметрический критерий Kruskal–Wallis (H-test). Различия считались достоверными при уровне значимости $p \leq 0.05$. Связь между концентрацией ртути в мышцах рыб с их размерно-возрастными показателями оценивали с помощью рангового коэффициента корреляции Спирмена (Rs). Связь считали статистически достоверной при $p \leq 0.05$. При значении Rs от 0.3 до 0.5 связь между показателями умеренная, от 0.5 до 0.7 – заметная, от 0.7 и выше – высокая.

Для оценки безопасности потребления рыбы населением концентрации ртути в мышцах рыб сравнивали с санитарно-эпидемиологическими правилами и нормативами, согласно которым концентрация ртути не должна превышать 0.3 мкг/г сырой массы в пресноводной нехищной рыбе и 0.6 мкг/г сырой массы в хищной пресноводной рыбе. Также рассчитывали безопасную дозу поступления металла в организм человека при питании рыбой. Кроме того, вычисляли долю особей с концентрацией ртути выше установленных требований.

Допустимое (безопасное) еженедельное потребление рыбы (CRLim) определяли дифференцированно для каждого вида по формуле (Bloom, 1992):

$$\text{CRLim} = \frac{\text{RfD} \times \text{BW}}{\text{Cm}}$$

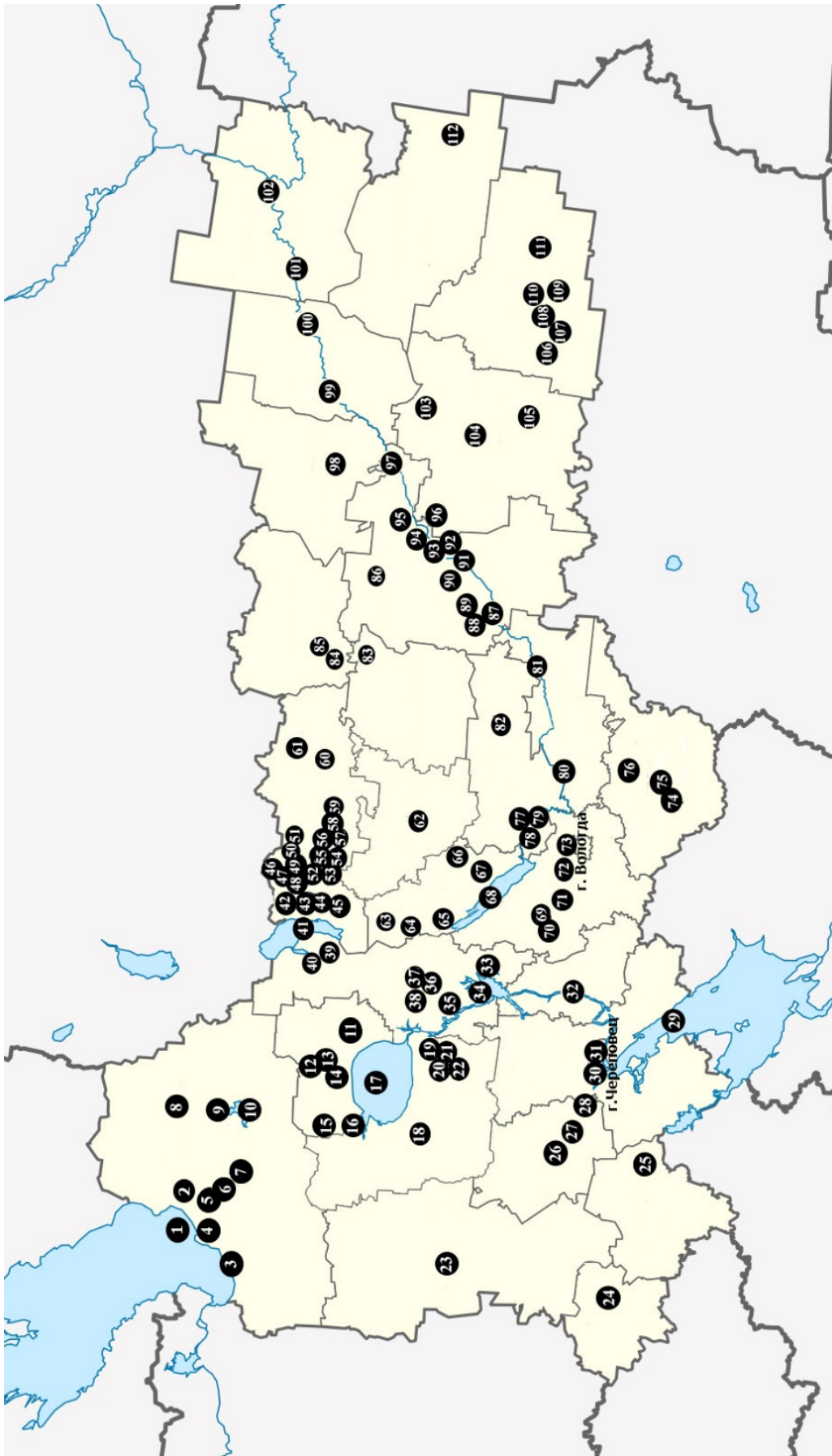


Рис. 1. Точки лова рыбы для определения содержания ртути.

Табл. 1. Местоположение, видовой состав и объем собранного материала для определения содержания ртути в мышечной ткани рыб. Виды рыб: 1 – стерлядь, 2 – синец, 3 – лещ, 4 – белоглазка, 5 – уклейка, 6 – жерех, 7 – густера, 8 – серебряный карась, 9 – золотой карась, 10 – пескарь, 11 – голавль, 12 – язь, 13 – елец, 14 – чехонь, 15 – плотва, 16 – красноперка, 17 – линь, 18 – щука, 19 – корюшка, 20 – снеток, 21 – ряпушка, 22 – килец, 23 – сиг, 24 – сиг-нельмушка, 25 – хариус, 26 – радужная форель, 27 – лосось, 28 – паляя, 29 – налим, 30 – ерш, 31 – окунь, 32 – судак, 33 – берш, 34 – головешка-ротан.

№	Название водного объекта	Муниципальный район (округ)	Виды рыб	Кол-во видов	Кол-во экземпляров
1	оз. Онежское	Вытегорский	3, 7, 15, 18, 19, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32	16	495
2	оз. Тудозеро	Вытегорский	3, 7, 15, 16, 18, 23, 29, 31, 32	9	113
3	р. Мегра	Вытегорский	3, 15, 16, 18, 25, 29, 31	7	22
4	оз. Великое	Вытегорский	3, 7, 9, 14, 15, 16, 18, 29, 31, 32	10	224
5	Вытегорское вдхр.	Вытегорский	3, 6, 7, 12, 14, 15, 16, 18, 31, 32, 33	11	104
6	Белоусовское вдхр.	Вытегорский	3, 5, 7, 14, 15, 18, 31, 32, 33	9	161
7	Новинкинское вдхр.	Вытегорский	2, 3, 4, 6, 7, 12, 14, 15, 18, 30, 31, 32	12	77
8	оз. Кемское	Вытегорский	2, 18	2	57
9	оз. Куужозеро	Вытегорский	3, 15, 31, 32	4	16
10	Ковжское вдхр.	Вытегорский	3, 15, 18, 21, 29, 31, 32	7	148
11	оз. Волоцкое	Вашкинский	3, 8, 15, 16, 30, 31, 32	7	77
12	оз. Боровское	Вашкинский	15, 31	2	27
13	оз. Ананьино	Вашкинский	3, 15, 18, 19, 29, 30, 31	7	90
14	оз. Святозеро	Вашкинский	3, 7, 12, 15, 16, 18, 19, 29, 30, 31	10	144
15	оз. Ярбозеро	Вашкинский	3, 7, 12, 15, 16, 30, 31	7	51
16	р. Кема	Вашкинский	3, 6, 18, 29, 32	5	13
17	оз. Белое	Вашкинский, Белозерский	2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 29, 30, 31, 32, 33	20	851
18	оз. Андозеро	Белозерский	3, 7, 14, 15, 16, 18, 31, 32	8	103
19	оз. Кожино	Белозерский	3, 15, 16, 17, 18, 31	6	48
20	оз. Лозское	Белозерский	3, 7, 12, 15, 16, 18, 31, 32	8	42
21	оз. Моткозеро	Белозерский	3, 7, 15, 16, 18, 29, 31, 32	8	71
22	оз. Азатское	Белозерский	3, 7, 9, 15, 16, 18, 26, 31, 32	9	152
23	оз. Серхловское	Бабаевский	18, 31	2	27
24	оз. Синичье	Чагодощенский	18, 31	2	49
25	р. Молога	Устюженский	1, 2, 3, 4, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 18, 30, 31, 32, 33	16	474
26	р. Колпь	Кадуйский	12, 15, 18, 31	4	21
27	р. Суда	Кадуйский	3, 7, 11, 15, 18, 29, 30, 31	8	153

№	Название водного объекта	Муниципальный район (округ)	Виды рыб	Кол-во видов	Кол-во экземпляров
28	р. Андога	Кадуйский	2, 3, 7, 15, 29, 31	6	19
29	Рыбинское вдхр.	Череповецкий	3, 7, 8, 12, 15, 18, 21, 29, 30, 31, 32, 33	12	366
30	р. Ягорба	Череповецкий	2, 3, 6, 12, 15, 30, 31, 32	8	52
31	р. Шексна (г. Череповец)	Череповецкий	2, 3, 6, 7, 11, 12, 15, 18, 29, 31, 32	11	224
32	р. Шексна (д. Потеряево)	Шекснинский	2, 3, 6, 7, 12, 14, 15, 18, 31, 32, 33	11	161
33	оз. Узбинское	Кирилловский	15, 31	2	31
34	Шекснинское вдхр.	Кирилловский, Шекснинский	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 26, 29, 30, 31, 32, 33	22	848
35	карьеры у д. Коврижново	Кирилловский	3, 15, 31	3	18
36	оз. Ильинское	Кирилловский	3, 9, 18, 31	4	24
37	оз. Спасское	Кирилловский	3, 9, 15, 18, 31	5	48
38	оз. Бородаевское	Кирилловский	3, 9, 12, 15, 18, 31	6	61
39	оз. Вещозеро	Кирилловский	3, 5, 7, 12, 15, 29, 30, 31	8	173
40	оз. Святое	Кирилловский	3, 5, 7, 15, 18, 19, 21, 29, 30, 31, 32	11	252
41	оз. Воже	Кирилловский, Вожегодский	3, 5, 7, 12, 15, 18, 29, 30, 31, 32	10	980
42	оз. Данислово	Вожегодский	15, 31	2	18
43	оз. Бекетовское	Вожегодский	9	1	58
44	р. Ильменец	Вожегодский	13, 25	2	16
45	оз. Мунское	Вожегодский	9	1	37
46	оз. Орехово	Вожегодский	15, 31	2	39
47	оз. Пертозеро	Вожегодский	3, 9, 15, 18, 26, 30, 31	7	148
48	оз. Сиенское	Вожегодский	15, 31	2	29
49	оз. Моренно	Вожегодский	15	1	11
50	оз. Святое	Вожегодский	3, 9, 15, 18, 31	5	114
51	оз. Салозеро	Вожегодский	15, 31	2	65
52	р. Вожега	Вожегодский	3, 7, 12, 13, 15, 18, 25, 29, 30, 31	10	193
53	оз. Гагатрино	Вожегодский	31	1	25
54	оз. Коргозеро	Вожегодский	3, 15, 31	3	60
55	оз. Монозеро	Вожегодский	31	1	35
56	оз. Чунозеро	Вожегодский	15, 18, 31	3	48
57	оз. Долгое	Вожегодский	3, 15, 18, 30, 31	5	62
58	оз. Таменское	Вожегодский	31	1	18
59	оз. Большое Яхреньгское	Вожегодский	15, 31	2	20
60	оз. Погорелово	Вожегодский	31	1	13

№	Название водного объекта	Муниципальный район (округ)	Виды рыб	Кол-во видов	Кол-во экземпляров
61	оз. Черное	Вожегодский	9, 15	2	16
62	р. Кубена, г. Харовск	Харовский	13, 31	2	20
63	р. Уфтюга, д. Паниха	Усть-Кубинский	11, 13, 15, 18, 30, 31	6	55
64	р. Уфтюга, д. Богородское	Усть-Кубинский	3, 7, 12, 13, 15, 24, 31	7	45
65	р. Уфтюга, д. Тавлаш	Усть-Кубинский	3, 7, 12, 15, 18, 24, 29, 30, 31, 32	10	116
66	оз. Глухое	Усть-Кубинский	15, 18	2	9
67	р. Кубена, с. Устье	Усть-Кубинский	3, 5, 7, 12, 15, 18, 30, 31	8	125
68	оз. Кубенское	Усть-Кубинский, Вологодский	3, 5, 7, 9, 12, 13, 15, 16, 18, 24, 29, 30, 31, 32	14	656
69	оз. Дмитровское	Вологодский	15, 18, 30, 31	4	88
70	оз. Косковское	Вологодский	9, 15, 18, 31	4	79
71	р. Ема	Вологодский	5, 10, 13, 15, 30, 31	6	25
72	Сибирский пруд (г. Вологда)	Вологодский	34	1	15
73	р. Вологда	Вологодский	3, 7, 12, 15, 18, 30, 31, 32	8	166
74	пруд на р. Синичка	Грязовецкий	34	1	15
75	р. Нурма	Грязовецкий	31	1	10
76	р. Лежа	Грязовецкий	5, 15, 31	3	65
77	пруды в г. Сокол	Сокольский	15, 18, 31	3	5
78	оз. Озерко	Сокольский	9	1	18
79	р. Сухона, г. Сокол	Сокольский	3, 7, 12, 15, 18, 31	6	46
80	р. Сухона, с. Шуйское	Междуреченский	3, 6, 7, 12, 15, 18, 30, 31	8	110
81	р. Сухона, д. Кожухово	Междуреченский	1, 3, 4, 7, 11, 12, 15, 18, 31, 32	10	106
82	р. Вотча	Сокольский	25	1	31
83	р. Киюг	Сямженский	13, 25	2	12
84	р. Костюга	Верховажский	25	1	25
85	р. Вага	Верховажский	13, 15, 25	3	21
86	оз. Глубокое	Тотемский	3, 12, 15, 18, 31	5	28
87	р. Сухона, п. Юбилейный	Тотемский	3, 7, 12, 15, 31	5	25
88	р. Тиксна	Тотемский	13, 25	2	17
89	р. Вопра	Тотемский	13	1	10
90	р. Царева	Тотемский	13	1	11
91	р. Сухона, д. Устье	Тотемский	1, 3, 4, 7, 11, 12, 15, 30, 31	9	39
92	р. Печеньжица	Тотемский	13	1	20
93	р. Сухона, г. Тотьма	Тотемский	1, 3, 4, 7, 12, 13, 15, 18, 29, 31	10	121

№	Название водного объекта	Муниципальный район (округ)	Виды рыб	Кол-во видов	Кол-во экземпляров
94	р. Еденьга	Тотемский	12, 13, 25	3	72
95	р. Нореньга	Тотемский	13	1	10
96	р. Леденьга	Бабушкинский	13	1	10
97	р. Сухона, д. Коченьга	Тотемский	3, 4, 7, 12, 15, 31	6	35
98	р. Шебеньга	Тарногский	25	1	15
99	р. Сухона, с. Нюксеница	Нюксенский	1, 4, 15, 30, 31	5	38
100	р. Сухона, д. Вострое	Нюксенский	4, 7, 11, 12, 15, 18, 30, 31, 32	9	58
101	р. Сухона, д. Полдарса	Великоустюгский	1	1	31
102	р. Сухона, г. Великий Устюг	Великоустюгский	4, 11, 12, 13, 15, 31	6	16
103	оз. Бабье	Бабушкинский	31	1	8
104	р. Юрманга	Бабушкинский	25	1	5
105	р. Юза	Бабушкинский	13	1	17
106	р. Унжа	Никольский	5, 13, 31	3	20
107	р. Лундонга	Никольский	12, 13, 15, 25, 31	5	47
108	р. Большой Карныш	Никольский	13, 15	2	20
109	р. Пырнуг	Никольский	25	1	10
110	р. Земцовка	Никольский	25	1	50
111	р. Юг	Никольский	31	1	6
112	р. Ёнтала	Кичменгско-Городецкий	25	1	26

где CRlim – допустимое еженедельное потребление рыбы (г/неделю), RfD – допустимое еженедельное поступление ртути в организм человека, BW – масса тела человека, г, Cm – концентрация ртути в потребляемой рыбе, мкг/г. Референтная доза EPA = 0.0007 мкг/г массы тела в неделю⁶; референтная доза FAO = 0.0016 мкг/г массы тела в неделю⁷; средняя масса взрослого человека ≈ 70 кг, средняя масса детей среднего школьного возраста (11–15 лет) ≈ 42 кг, младшего школьного возраста (6–10 лет) ≈ 26 кг; дошкольного возраста (2–5 лет) ≈ 16 кг⁸.

Максимально допустимое среднее количество ртути в рыбе при заданном уровне потребления (количество порций в неделю) рассчитано по формуле⁶:

$$SV = \frac{RfD \times BW}{CR}$$

где SV – максимально допустимое количество ртути в рыбе при заданном уровне потребления (мкг/г), RfD – допустимое еженедельное поступление ртути в организм человека, BW – масса тела человека, г, CR – еженедельное потребление рыбы (г/неделю). Референтная доза EPA = 0.0007 мкг/г массы

⁶ Guidance for assessing chemical contaminant data for use in fish advisories. Volume 1: Fish sampling and analysis. Third edition, 2000. EPA, Washington, DC, USA.

⁷ Committee on toxicity of chemicals in food consumer products and the environment. Updated COT statement on a survey of mercury in fish and shellfish, 2003.

⁸ WHO. Weight-for-age (5–10 years), 2007. Электронный ресурс. URL: <https://www.who.int/tools/growth-reference-data-for-5to19-years/indicators/weight-for-age-5to10-years> (дата обращения: 10.09.2023).

тела в неделю. Еженедельное потребление рыбы рассчитывалось с учетом массы порции для определенной возрастной группы населения (для взрослого человека – 150 г; для детей 11–15 лет – 110 г, 6–10 лет – 90 г, 2–5 лет – 70 г⁹) и количества порций в неделю (1, 2 и 3 шт).

Результаты и обсуждение

Содержание ртути в мышечной ткани рыб, отловленных в водных объектах Вологодской области, изменяется в широких пределах: от 0.001 мкг/г в мышцах отдельных особей плотвы, густеры и ельца до 2.492 мкг/г сырой массы у окуня. Минимальные средние концентрации металла в мышцах отмечены у радужной форели и снетка, а максимальные – у жереха и кильца (Рис. 2). У отдельных экземпляров радужной форели и снетка максимальные концентрации ртути приближаются к 0.1 мкг/г; линя, сига, головешки-ротана, хариуса, карася – варьируют от 0.2 до 0.4 мкг/г; стерляди, уклейки, ряпушки, берша, сига-нельмушки, пескаря, красноперки, палии – от 0.4 до 0.6 мкг/г; синца, ельца, голавля, налима, язя, лосося и кильца – от 0.6 до 0.8 мкг/г; белоглазки, чехони и корюшки – от 0.8 до 1.0 мкг/г. Максимальные концентрации металла превышали 1.0 мкг/г у леща, плотвы, густеры, судака, ерша и жереха, 1.5 мкг/г – у щуки и 2.0 мкг/г – у окуня. Средние концентрации ртути в мышцах рыб из водных объектов Вологодской области сопоставимы с концентрациями ртути в рыбах из пресноводных водоемов и водотоков различных регионов России и мира (Комов и др., 2014; Немова и др., 2014; Allen-Gil et al., 1997; Arantes et al., 2016; Kalkan et al., 2015; Li et al., 2015; Milanov et al., 2016; Pal and Ghosh, 2013; Siraj et al., 2016). Так, по данным Европейского агентства по безопасности пищевых продуктов, пресноводные виды рыб накапливают в среднем следующие концентрации ртути: плотва – 0.12; окунь – 0.17; лещ – 0.23; щука – 0.39 мкг/г сырой массы (Cottril et al., 2012). По результатам наших исследований, среднее содержание металла в мышечной ткани плотвы из водоемов Вологодской области составило 0.18 мкг/г, окуня – 0.33 мкг/г, леща – 0.13 мкг/г и щуки – 0.38 мкг/г.

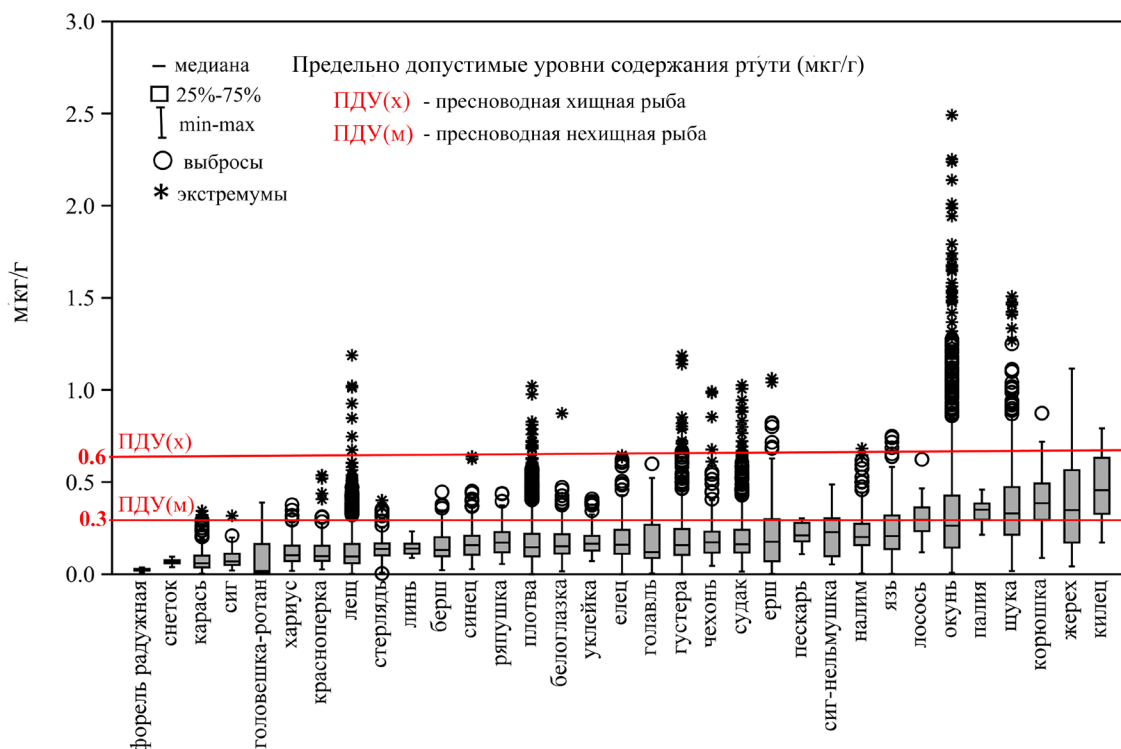


Рис. 2. Содержание ртути в мышцах разных видов рыб (мкг/г, сырой массы) Вологодской области.

⁹ СанПиН 2.3/2.4.3590-20. Санитарно-эпидемиологические требования к организации общественного питания населения.

Трофическая специализация – один из ведущих факторов, определяющих содержание ртути в мышечной ткани рыб. Особенность миграции ртути по пищевой цепи состоит в том, что ее концентрации в органах и тканях экспоненциально увеличиваются при переходе на каждый более высокий трофический уровень (Bloom, 1992). В результате содержание ртути в хищных рыбах может превышать фоновые концентрации в сотни тысяч и даже миллионы раз (Croteau et al., 2005).

Рыбы Вологодской области по особенностям питания делятся на две крупные группы: мирные и хищные. Хищные, или ихтиофаги, в большинстве случаев питаются другими видами рыб; на ранних стадиях развития основным кормом им служат крупные беспозвоночные, в особенности личинки насекомых. Среди исследованных видов рыб к этой группе относятся окунь, щука, судак, жерех, налим, лосось, берш. Вторую, более многочисленную, группу составляют мирные виды. В зависимости от преобладающего компонента питания их делят на планктофагов, бентофагов, фитобентофагов, эврифагов и видов смешанного типа питания (Слынько и Терещенко, 2014). Планктофаги, к которым относятся синец, уклейка, ряпушка, снеток, преимущественно питаются зоопланктоном; бентофаги (белоглазка, лещ, елец, стерлядь, ерш, сиги) потребляют бентосные организмы; фитобентофаги (плотва, красноперка, густера, караси, линь) – преимущественно бентос и растения. Наибольшим разнообразием в питании отличаются эврифаги (язь, хариус, голавль, ротан), которые наряду с разнообразными группами бентосных беспозвоночных в значительном количестве потребляют и рыбу. Похожее положение занимают планктоихтиофаги, взрослые особи которых часто питаются молодью рыб (чехонь) и способны формировать экологические группы с хищным типом питания (корюшка и килец).

Установлены достоверные различия в содержании ртути при сравнении трофических групп рыб. Наиболее низкие концентрации (0.025 ± 0.002 мкг/г) отмечены у радужной форели, которая содержится в садках и питается специализированным высококалорийным искусственным кормом. Между сходными по спектру питания ихтиофагами и планктоихтиофагами, а также бентофагами и фитобентофагами достоверных отличий не выявлено. Наибольшие концентрации ртути отмечены у планктоихтиофагов (0.271 ± 0.009 мкг/г) и хищников (0.304 ± 0.004 мкг/г) (Табл. 2). Таким образом, хищные рыбы как наиболее крупные, долгоживущие, занимающие высокое положение в пищевой цепи содержат больше ртути и поэтому с точки зрения воздействия на здоровье человека представляют наибольшую опасность.

Табл. 2. Содержание ртути в мышцах рыб разных трофических групп (мкг/г сырой массы) водных объектов Вологодской области. N – объем выборки, AM – средняя арифметическая, SE – ошибка средней арифметической, Min – минимальное значение, Max – максимальное значение; буквами показаны статистически значимые различия между концентрациями ртути в мышечной ткани рыб разных трофических групп (H-test) при уровне значимости $p \leq 0.05$ (Kruskal–Wallis test).

№	Трофическая группа	Виды рыб	N	Hg, мкг/г				H-test
				AM	SE	Min	Max	
1	Искусственный корм	форель радужная	13	0.025	0.002	0.010	0.036	a
2	Планктофаги	ряпушка, синец, уклейка, снеток	650	0.150	0.003	0.027	0.638	b
3	Бентофаги	сиг, ерш, лещ, елец, белоглазка, стерлядь, сиг-нельмушка, пескарь	2434	0.168	0.003	0.001	1.184	c
4	Фитобентофаги	густера, карась золотой, карась серебряный, красноперка, линь, плотва	2564	0.172	0.003	0.001	1.184	c
5	Эврифаги	язь, хариус, ротан, голавль	626	0.188	0.005	0.002	0.749	d
6	Планктоихтиофаги	чехонь, корюшка, килец	336	0.271	0.009	0.045	0.992	e
7	Ихтиофаги	щука, судак, берш, лосось, жерех, налим, окунь, паляя	4097	0.302	0.004	0.003	2.492	e

Табл. 3. Корреляционная зависимость содержания ртути в мышцах рыб от их размерно-возрастных показателей. N – объем выборки; Rs – коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Жирным шрифтом отмечена достоверная корреляционная связь ($R_s \geq 0.3$ при уровне значимости $p \leq 0.05$) между содержанием ртути в мышечной ткани рыб и их размерно-возрастными характеристиками.

Вид	N	ртуть/возраст рыб		ртуть/масса рыб		ртуть/длина рыб	
		R_s	p	R_s	p	R_s	p
Форель радужная	13	–	–	0.283	0.347	0.072	0.813
Снеток	30	–	–	0.412	0.023	0.388	0.033
Карась (золотой и серебряный)	171	0.491	0.000	0.035	0.646	0.032	0.674
Сиг	69	0.425	0.000	0.134	0.270	0.202	0.094
Ротан-головешка	34	0.171	0.332	0.323	0.062	0.198	0.261
Хариус	214	0.396	0.000	0.288	0.000	0.345	0.000
Красноперка	169	0.173	0.032	0.003	0.959	0.001	0.985
Лещ	1305	0.358	0.000	0.347	0.000	0.351	0.000
Стерлядь	297	0.371	0.000	0.292	0.000	0.278	0.000
Линь	33	0.107	0.572	0.106	0.554	0.122	0.498
Берш	150	0.043	0.625	0.148	0.069	0.156	0.055
Синец	318	0.566	0.000	0.380	0.000	0.418	0.000
Ряпушка	164	0.211	0.089	0.520	0.000	0.427	0.000
Плотва	1554	0.255	0.000	0.117	0.000	0.197	0.000
Белоглазка	135	0.219	0.010	0.162	0.052	0.183	0.032
Уклейка	138	0.277	0.006	0.135	0.112	0.050	0.555
Елец	322	0.547	0.000	0.473	0.000	0.480	0.000
Голавль	16	0.482	0.006	0.800	0.000	0.803	0.000
Густера	637	0.326	0.000	0.361	0.000	0.398	0.000
Чехонь	220	0.283	0.000	0.329	0.000	0.406	0.000
Судак	721	0.434	0.000	0.473	0.000	0.478	0.000
Ерш	258	0.404	0.000	0.132	0.033	0.139	0.524
Пескарь	14	0.442	0.017	0.654	0.028	0.646	0.031
Сиг-нельмушка	34	0.126	0.308	0.153	0.384	0.024	0.891
Налим	231	0.530	0.000	0.472	0.000	0.479	0.000
Язь	362	0.407	0.000	0.429	0.000	0.447	0.000
Окунь	2339	0.576	0.000	0.564	0.000	0.587	0.000
Лосось	21	0.174	0.430	0.266	0.149	0.256	0.338
Палия	15	0.130	0.641	0.242	0.383	0.403	0.135
Щука	543	0.504	0.000	0.461	0.000	0.476	0.000
Корюшка	99	0.481	0.013	0.451	0.000	0.477	0.000
Жерех	77	0.872	0.000	0.772	0.000	0.822	0.000
Килец	17	0.445	0.007	0.385	0.030	0.637	0.005

Возраст и продолжительность жизни также влияют на содержание ртути в организме рыб. Концентрация ртути в органах и тканях у долгоживущих видов, как правило, выше, чем у короткоживущих; у медленно растущих видов выше, чем у быстро растущих; у более крупных и старых особей выше, чем у молодых (Степанова и Комов, 1997; Ivanova et al., 2023; Soltani et al., 2021; Sonesten, 2003). Для 19 исследованных видов установлены достоверные корреляционные связи содержания ртути в мышечной ткани с возрастом, для 18 видов – с длиной тела и для 17 видов – с массой тела (Табл. 3). Достоверная положительная связь между содержанием ртути и возрастом отмечена у карася, сига, хариуса, леща, стерляди, синца, ельца, голавля, густеры, судака, ерша, пескаря, налима, язя, окуня, щуки, корюшки, кильца и жерева. Наиболее сильная связь проявляется у ихтиофагов. Так, коэффициент ранговой корреляции Спирмена (R_s) между концентрацией ртути и размерно-возрастными показателями (возраст, масса, длина) у судака составлял 0.434–0.478, щуки – 0.461–0.504, налима – 0.472–0.530, окуня – 0.564–0.587, жерева – 0.722–0.872. В то же время у большинства мирных видов (красноперка, линь, плотва, белоглазка, уклейка) и эврифагов (головешка-ротан, чехонь) связь отсутствует или выражена слабо.

Сравнение концентраций ртути в мышцах рыб с действующими в России гигиеническими требованиями безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов показало, что у 4.5% особей рыб Вологодской области концентрация ртути выше действующих норм для хищных видов рыб (< 0.6 мкг/г). Наиболее часто высокие концентрации металла встречаются у кильца (29.4%), жерева (20.8%), щуки (12.9%) и окуня (11.9%), реже у корюшки, палии, голавля, ерша, лосося, густеры, чехони, судака, а единично – у язя, налима, ельца, плотвы, белоглазки и леща (Табл. 4). Концентрации ртути, не превышающие рекомендованные для нехищной пресноводной рыбы (0.3 мкг/г), обнаружены только у трех видов – радужной форели, снетка и линя. Концентрация ртути выше 0.3 мкг/г наблюдалась у 3% особей сига, стерляди, хариуса и головешки-ротана, у 10% особей красноперки, берша, ряпушки, леща, синца, пескаря и белоглазки. У других мирных видов рыб доля особей с повышенным содержанием ртути составила 10–20% у уклейки, плотвы, леща, чехони, густеры и более 20% у сига-нельмушки, ерша, голавля и язя. В целом превышения установленных нормативов обнаружены у 12.1% экземпляров мирных видов и 9.5% экземпляров хищных видов рыб.

Предельно допустимые концентрации для продуктов питания отражают среднестатистические величины и часто оказываются неэффективными при оценке рисков для здоровья населения, связанных с алиментарным потреблением токсичных элементов и их соединений с продуктами питания. Поэтому при расчете и составлении рекомендаций лучше использовать критерий поступающей в организм безопасной дозы ртути, или RfD (referens dose), который учитывает коэффициенты усвоения и выведения ртути в организме, количество поступающей в организм ртути с минимальным негативным эффектом на здоровье¹⁰.

Объединенный комитет экспертов ФАО, который оценивает содержание загрязнителей в продуктах питания, установил величину безопасного допустимого еженедельного поступления метилртути в организм на уровне 0.0016 мкг/г массы тела в неделю. Наиболее строгие правила на сегодняшний день установлены EPA: безопасная ежедневная доза составляет 0.0007 мкг/г массы тела в неделю. Рекомендации ВОЗ направлены на сохранение здоровья взрослого населения, в то время как американские нормативы (EPA) преследуют цель предотвратить отрицательное влияние ртути на нервную систему развивающегося плода (Bell, 2017; Grandjean and Budtz-Jørgensen, 2007).

С учетом рекомендаций EPA безопасное допустимое еженедельное потребление искусственно выращенной в водоемах Вологодской области радужной форели для взрослого населения составляет почти 2000 г в неделю, для детей среднего школьного возраста – 1200 г, младшего школьного возраста – 700 г и дошкольного возраста – почти 500 г. Потребление дикой рыбы менее безопасно и в зависимости от вида рыб варьирует в пределах 104–740 г для взрослых людей, 62–444 г для детей среднего школьного возраста, 39–275 г для детей младшего школьного возраста и 24–169 г – для детей дошкольного возраста. Расчетные величины безопасного допустимого еженедельного потребления рыбы из водных объектов Вологодской области с учетом рекомендаций ФАО почти в 2.3 раза выше и составляют 237–1692 г в неделю для взрослого населения, 142–1015 г для детей 11–15 лет, 88–628 г для детей 6–10 лет и 54–387 г для детей 2–5 лет (Табл. 5).

Расчет количества порций в неделю рыбы с разным содержанием ртути, при котором еженедельное поступление ртути в организм человека не превышает RfD EPA, позволил разделить

¹⁰ UNEP. Executive summary of the document on guidance for identifying populations at risk from mercury exposure. Chiba, Japan, 24–28 January 2011.

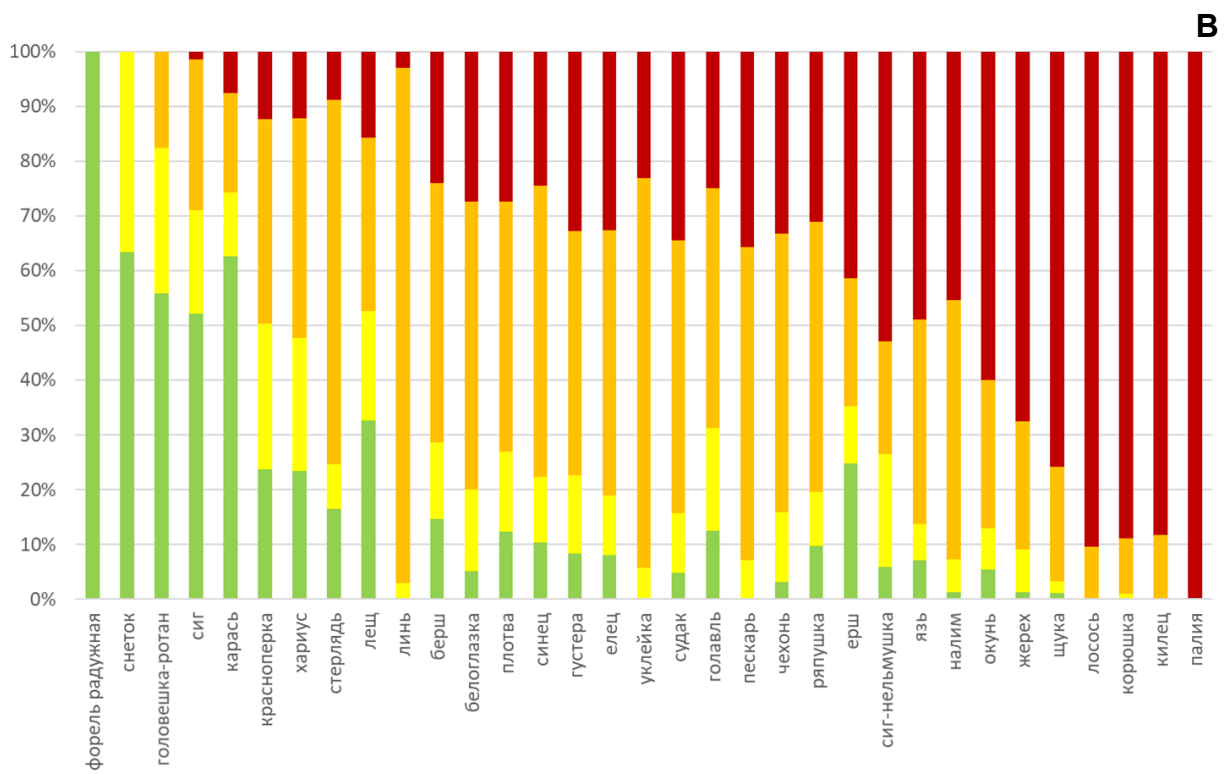
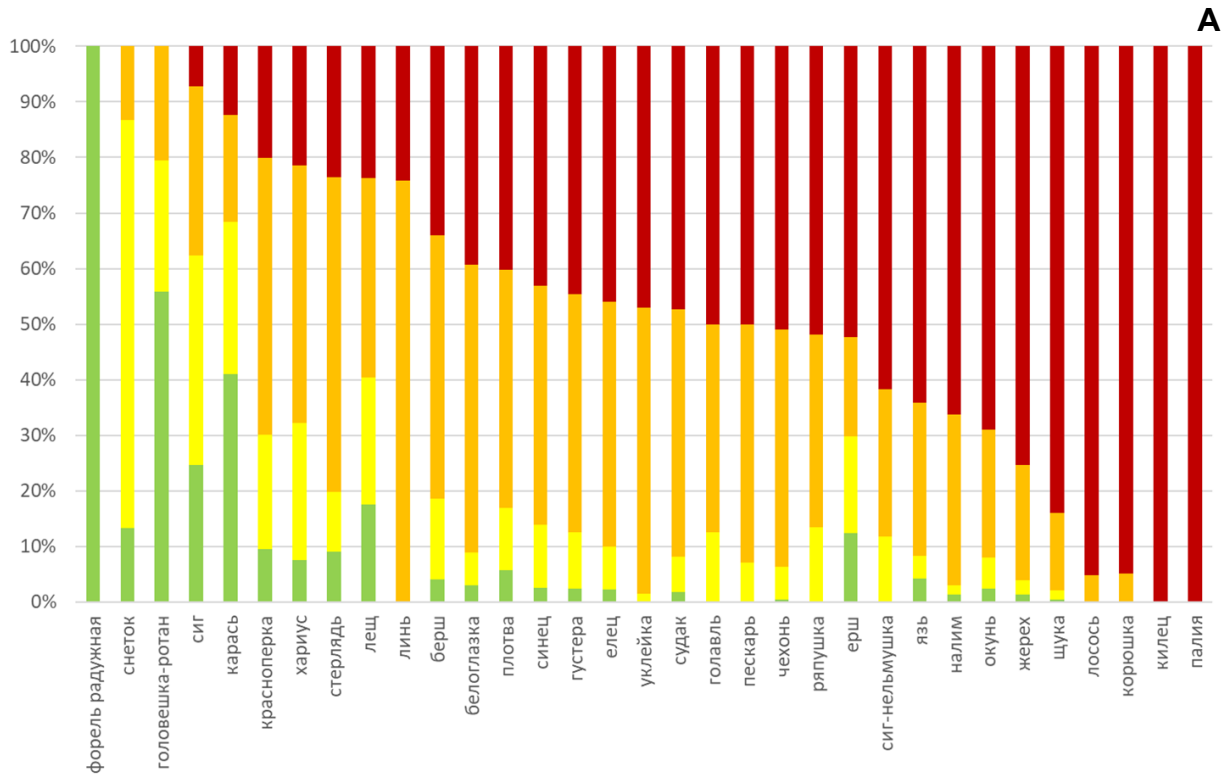
Табл. 4. Соотношение содержания ртути в мирных и хищных рыбах водных объектов Вологодской области с санитарно-гигиеническими нормами РФ.

Вид рыбы	N	Количество особей с содержанием Hg ≤ 0.299 мкг/г		Количество особей с содержанием Hg = 0.3–0.599 мкг/г		Количество особей с содержанием Hg ≥ 0.6 мкг/г	
		шт.	%	шт.	%	шт.	%
Искусственные корма							
Форель радужная	13	13	100.0	0	0.0	0	0.0
Мирные виды							
Снеток	30	30	100.0	0	0.0	0	0.0
Линь	33	33	100.0	0	0.0	0	0.0
Сиг	69	68	98.6	1	1.4	0	0.0
Хариус	214	210	98.1	4	1.9	0	0.0
Стерлядь	297	291	98.0	6	2.0	0	0.0
Карась	171	167	97.7	4	2.3	0	0.0
Ротан	34	33	97.1	1	2.9	0	0.0
Красноперка	169	162	95.9	7	4.1	0	0.0
Ряпушка	164	155	94.5	9	5.5	0	0.0
Лещ	1305	1215	93.1	81	6.2	9	0.7
Синец	318	296	93.1	20	6.3	2	0.6
Пескарь	14	13	92.9	1	7.1	0	0.0
Белоглазка	135	122	90.4	12	8.9	1	0.7
Уклейка	138	124	89.9	14	10.1	0	0.0
Плотва	1554	1367	88.0	168	10.8	19	1.2
Елец	322	277	86.0	40	12.4	5	1.6
Чехонь	220	189	85.9	26	11.8	5	2.3
Густера	637	534	83.8	84	13.2	19	3.0
Сиг-нельмушка	34	25	73.5	9	26.5	0	0.0
Ерш	258	195	75.6	50	19.4	13	5.0
Голавль	16	12	75.0	3	18.8	1	6.3
Язь	362	258	71.3	98	27.1	6	1.7
Корюшка	99	30	30.3	62	62.6	7	7.1
Килец	17	3	17.6	9	52.9	5	29.4
Всего	6610	5809	87.9	709	10.7	92	1.4
Хищные виды							
Берш	150	143	95.3	7	4.7	0	0.0
Судак	721	608	84.3	95	13.2	18	2.5
Налим	231	187	81.0	41	17.7	3	1.3
Лосось	21	12	57.1	8	38.1	1	4.8
Окунь	2339	1329	56.8	731	31.3	279	11.9
Щука	543	234	43.1	239	44.0	70	12.9
Жерех	77	32	41.6	29	37.7	16	20.8
Паляя	15	4	26.7	10	66.7	1	6.7
Всего	4097	2549	62.2	1160	28.3	388	9.5
ИТОГО	10720	8371	78.1	1869	17.4	480	4.5

Табл. 5. Безопасное допустимое количество потребления рыбы из водных объектов Вологодской области, г/неделю.

Виды рыб	N	Среднее содержание ртути в рыбе, мкг/г	Дети 2–5 лет		Дети 6–10 лет		Дети 11–15 лет		Взрослые	
			ЕРА	FAO	ЕРА	FAO	ЕРА	FAO	ЕРА	FAO
Форель радужная	13	0.025	455	1040	739	1690	1194	2730	1991	4550
Снеток	30	0.066	169	387	275	628	444	1015	740	1692
Караси	171	0.083	135	309	220	502	355	811	592	1352
Сиг обыкновенный	69	0.085	131	300	213	488	345	788	575	1313
Голевешка-ротан	34	0.092	122	280	199	455	321	734	536	1224
Хариус	214	0.122	92	209	149	340	240	549	401	915
Красноперка	169	0.124	90	206	147	335	237	541	395	902
Лещ	1305	0.130	86	197	140	320	226	517	377	861
Стерлядь	297	0.136	82	187	133	304	215	491	358	819
Линь	33	0.141	80	182	129	296	209	478	349	797
Берш	150	0.152	73	167	119	272	192	439	320	732
Синец	318	0.168	67	152	108	248	175	400	292	667
Ряпушка	164	0.174	64	147	105	239	169	386	282	644
Плотва	1554	0.177	64	145	103	236	167	382	278	636
Белоглазка	135	0.178	63	144	102	234	165	378	275	629
Уклейка	138	0.181	62	141	100	229	162	370	270	617
Елец	322	0.189	59	135	96	220	155	355	259	591

Виды рыб	N	Среднее содержание ртути в рыбе, мкг/г	Дети 2–5 лет		Дети 6–10 лет		Дети 11–15 лет		Взрослые	
			ЕРА	FAO	ЕРА	FAO	ЕРА	FAO	ЕРА	FAO
Голавль	16	0.192	58	134	95	217	153	351	256	585
Густера	637	0.198	56	129	92	210	148	339	247	565
Чехонь	220	0.202	56	127	90	206	146	334	243	556
Судак	721	0.203	55	126	90	205	145	331	242	552
Ерш	258	0.213	53	120	85	195	138	315	230	526
Пескарь	14	0.217	52	118	84	192	135	309	226	516
Сиг-нельмушка	34	0.218	51	117	84	191	135	308	225	514
Налим	231	0.226	49	113	80	184	130	297	217	495
Язь	362	0.236	47	108	77	176	125	285	208	474
Лосось	21	0.308	36	83	59	135	95	218	159	363
Окунь	2339	0.331	34	78	55	127	90	205	149	341
Паляя	15	0.344	33	74	53	121	86	195	143	326
Щука	543	0.378	30	68	48	110	78	178	130	296
Корюшка	99	0.392	29	65	46	106	75	171	125	286
Жерех	77	0.401	28	64	45	104	73	167	122	279
Килец	17	0.472	24	54	39	88	62	142	104	237



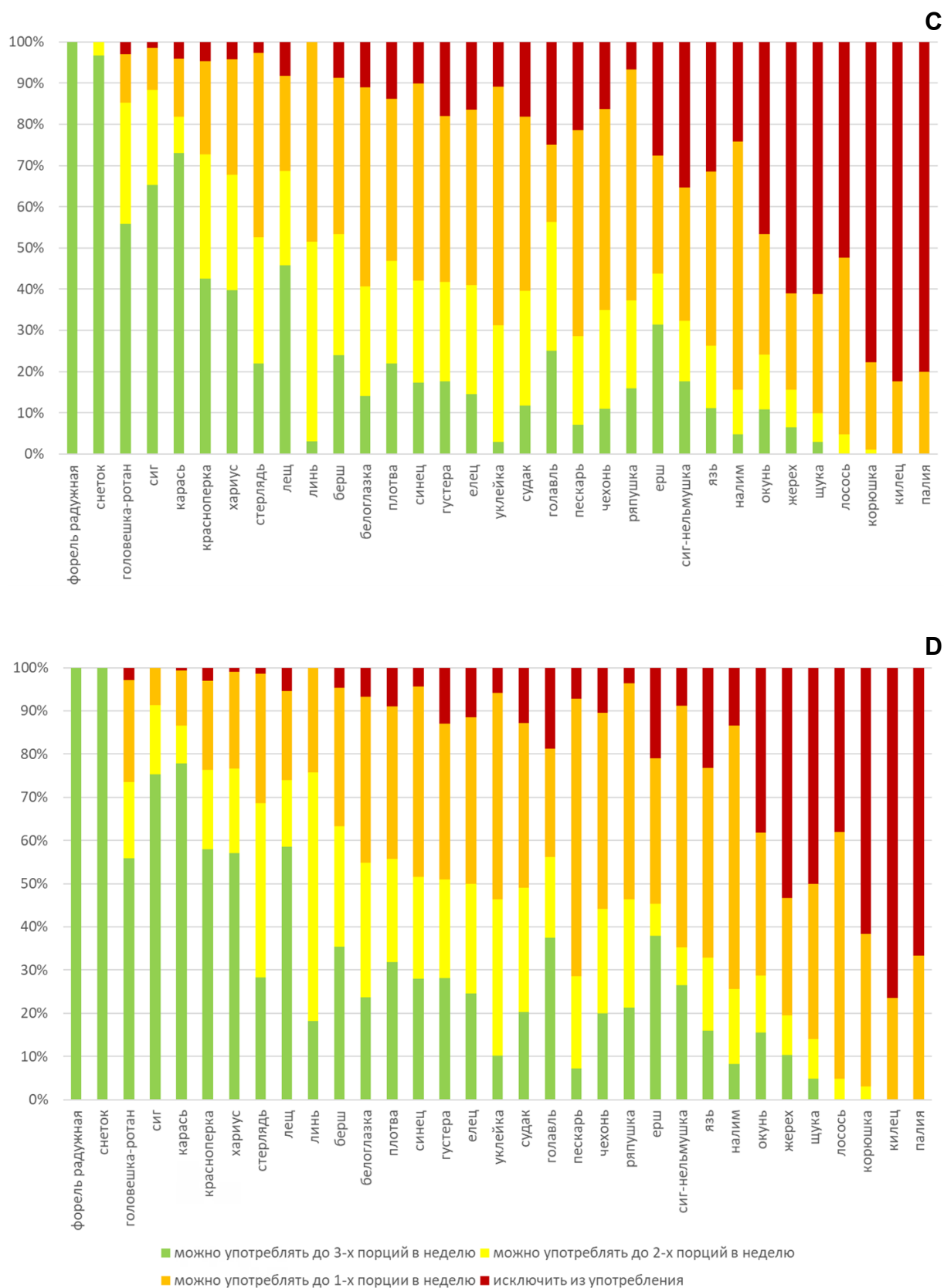


Рис. 3. Соотношение различных категорий еженедельного употребления в пищу рыбы определенными возрастными группами населения: **А** – дети дошкольного возраста (2–5 лет), порция 70 г; **В** – дети младшего школьного возраста (6–10 лет), порция 90 г; **С** – дети среднего школьного возраста (11–15 лет), порция 110 г, **Д** – взрослый человек, порция 150 г.

Табл. 6. Максимально допустимое содержание ртути в рыбе (мкг/г сырой массы) для людей определенного возраста при разных уровнях потребления.

Уровень потребления	Возрастная группа			
	2–5 лет	6–10 лет	11–15 лет	Взрослые
до 3-х порций в неделю	≤ 0.05	≤ 0.07	≤ 0.09	≤ 0.11
до 2-х порций в неделю	≤ 0.08	≤ 0.10	≤ 0.14	≤ 0.16
не более 1 порции в неделю	≤ 0.17	≤ 0.21	≤ 0.28	≤ 0.33
исключить из употребления	> 0.17	> 0.21	> 0.28	> 0.33

рыбу из местных водоемов на 4 категории: «можно употреблять до 3-х порций в неделю», «можно употреблять до 2-х порций в неделю», «можно употреблять не более 1 порции в неделю», «исключить из употребления» (Табл. 6).

Сопоставление наших результатов с рекомендациями ЕРА (Табл. 6) показывает, что в Вологодской области доля рыб с концентрациями ртути, при которых взрослому населению необходимо полностью исключить рыбу из рациона (> 0.33 мкг/г) и употреблять ее в пищу не чаще одной порции в неделю (0.16–0.33 мкг/г) составляет 18 и 34% соответственно. Доля рыб с концентрациями ртути, при которых рыбу следует исключить из рациона детей различного возраста или ограничить до одной порции в неделю для возрастной группы 2–5 лет составляет 50 и 34%, для 6–10 лет – 37 и 38%, для 11–15 лет – 24 и 35% соответственно.

Сравнение между видами рыб показало, что 20–40% окуня, лосося и язя, 40–60% щуки и жереха, а также 60–80% кильца, палии и корюшки содержит концентрации ртути, опасные для здоровья взрослых людей (Рис. 3). Содержание ртути, опасное для детей дошкольного возраста, выявлено у 60–80% щуки, жереха, окуня, налима, язя и сига-нельмушки, 40–60% – у судака, уклеи, ельца, густеры, синца и плотвы. В связи с этим местному населению рекомендуется максимально ограничить регулярное питание указанными видами рыб. Кильца, палию, лосося и корюшку необходимо полностью исключить из рациона дошкольников. Питание радужной форели и снетком наиболее безопасно для всех категорий населения.

Заключение

Концентрация ртути у рыб из водных объектов Вологодской области варьирует в широких пределах – размах между минимальными и максимальными значениями составляет три порядка. Наиболее низкие концентрации металла (0.001 мкг/г сырой массы) выявлены в мышцах плотвы, густеры и ельца, наиболее высокие (> 1.5 мкг/г) – в мышцах щуки и окуня. Максимальные средние концентрации отмечены у типично хищных видов (щука, окунь, жерех, лосось, палия) и хищных форм (килец, корюшка) мирных видов. Минимальные средние концентрации отмечены у радужной форели, которая выращивается в садковых хозяйствах на искусственных кормах, и у снетка – типичного планктофага. Содержание ртути в мышцах рыб зависит от трофической специализации отдельных видов, возраста и размера рыб. Хищные рыбы, как наиболее крупные, долгоживущие, занимающие верхние уровни в пищевой цепи, содержат больше ртути и наиболее опасны для здоровья человека в случае регулярного употребления их в пищу.

Результаты оценки безопасного количества потребляемой рыбы зависят от метода расчета, основанного либо на безопасной дозе ртути, попадающей в организм человека за определенный период времени, либо на безопасной концентрации ртути в рыбе. Установлено, что количество ртути в мышцах рыб, отловленных в разных водоемах Вологодской области, превышает предельно допустимые концентрации для рыбных продуктов у 9.5% особей исследованных хищных и 12.1% особей мирных видов рыб. В то же время с учетом безопасной дозы ртути, поступающей в организм человека, количество небезопасной для употребления взрослым населением рыбы в 1.5 раза (на 23%) больше, чем количество рыбы, превышающей федеральные нормативные уровни по ртути. Взрослому населению рекомендуется исключить из употребления до 18% рыбы, детям среднего школьного возраста – до 24%, младшего школьного – 37%, а дошкольного возраста – почти 50%.

Таким образом, федеральная система нормирования актуальна только для ограничения потребления мирной рыбы взрослым населением. Принятые в РФ нормативы фактически не ограничивают потребление рыбы, опасной для здоровья детей.

Список литературы

- Борисов, М.Я., Коновалов, А.Ф., Думнич, Н.В., 2019. Рыбы в Вологодской области. Порт-Апрель, Череповец, Россия, 128 с.
- Комов, В.Т., Пронин, Н.М., Мендсайхан, Б., 2014. Содержание ртути в мышцах рыб реки Селенги и озер ее бассейна (Россия). *Биология внутренних вод* 7, 178–184.
- Немова, Н.Н., Лысенко, Л.А., Мещерякова, О.В., Комов, В.Т., 2014. Ртуть в рыбах: биохимическая индикация. *Биосфера* 6 (2), 176–186.
- Рыбы в заповедниках России. Т. 1. Пресноводные рыбы, 2010. Решетников, Ю.С. (ред.). Товарищество научных изданий КМК, Москва, Россия, 628 с.
- Слынько, Ю.В., Терещенко, В.Г., 2014. Рыбы пресных вод Понто-Каспийского бассейна (Разнообразие, фауногенез, динамика популяций, механизмы адаптаций). ПОЛИГРАФ-ПЛЮС, Москва, Россия, 328 с.
- Степанова, И.К., Комов, В.Т., 1997. Накопление ртути в рыбе из водоемов Вологодской области. *Экология* 4, 295–299.
- Allen-Gil, S.M., Gubala, C.P., Landers, D.H., Lasorsa, B.K., Crecelius, E.A., Curtis, L.R., 1997. Heavy metal accumulation in sediment and freshwater fish in U.S. Arctic lakes. *Environmental Toxicology and Chemistry* 16, 733–741.
- Arantes, F.P., Savassi, L.A., Santos, H.B., Gomes, M.V.T., Bazzoli, N., 2016. Bioaccumulation of mercury, cadmium, zinc, chromium, and lead in muscle, liver, and spleen tissues of a large commercially valuable catfish species from Brazil. *Anais Da Academia Brasileira De Ciências* 88, 137–147.
- Bell, L., 2017. Mercury in women of child-bearing age in 25 countries. IPEN, Göteborg, Sweden, 69 p.
- Bloom, N.S., 1992. On the chemical form of mercury in edible fish and marine invertebrate tissues. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 49, 1010–1017.
- Chouvelon, T., Warnau, M., Churlaud, C., Bustamante, P., 2009. Hg concentrations and related risk assessment in coral reef crustaceans, molluscs and fish from New Caledonia. *Environmental Pollution* 157 (1), 331–340.
- Cottril, B., Dogilotti, E., Edier, L., Furst, P., 2012. Scientific Opinion on the risk for public health related to the presence of mercury and methylmercury in food. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). *EFSA Journal* 10 (12), 1–241.
- Croteau, M., Luoma, S.N., Stewart, A.R., 2005. Trophic transfer of metals along freshwater food webs: Evidence of cadmium biomagnification in nature. *Limnology and Oceanography* 50 (5), 1511–1519.
- Grandjean, P., Budtz-Jørgensen, E., 2007. Total imprecision of exposure biomarkers: Implications for calculating exposure limits. *American Journal of Industrial Medicine* 50 (10), 712–719.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D., 2001. Past: palaeontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologica Electronica* 1, 1–49.
- Houston, M., 2011. Role of mercury toxicity in hypertension, cardiovascular disease, and stroke. *Journal of Clinical Hypertension* 13 (8), 621–627.
- Ivanova, E., Eltsova, L., Komov, V., Borisov, M., Tropin, N. et al., 2023. Assessment of the consumptive safety of mercury in fish from the surface waters of the Vologda region in northwestern Russia. *Environmental Geochemistry and Health* 45, 863–879. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01254-4>

- Kalkan, H., Sisman, T., Kilic, D., 2015. Assessment of heavy metal bioaccumulation in some tissues of *Leuciscus cephalus* from Karasu River, Erzurum-Turkey. *Austin Journal of Environmental Toxicology* 1, 1004.
- Li, P., Zhang, J., Xie, H., Liu, C., Liang, S., Ren, Y., Wang, W., 2015. Heavy metal bioaccumulation and health hazard assessment for three fish species from Nansi Lake, China. *Bulletin of Environment Contamination and Toxicology* 94, 431–436.
- Myers, G.J., Davidson, P.W., Strain, J.J., 2007. Nutrient and methyl mercury exposure from consuming fish. *The Journal of Nutrition* 137 (12), 2805–2808.
- Milanov, D.R., Krstic, P.M., Markovic, V.R., Jovanovic, A.D., Baltic, M.B., Ivanovic, S.J., Baltic, Z.M., 2016. Analysis of heavy metals concentration in tissues of three different fish species included in human diet from Danube River. *Acta Veterinaria* 66, 89–102.
- Pal, M., Ghosh, M., 2013. Assay of biochemical compositions of two Indian fresh water el with special emphasis on accumulation of toxic heavy metals. *Journal of Aquatic Food Product Technology* 22, 27–35.
- Rice, K.M., Walker, E.M., Wu, M., Gillette, C., Blough, E.R., 2014. Environmental mercury and its toxic effects. *Journal of Preventive Medicine and Public Health* 47 (2), 74–83.
- Siraj, M., Khisroon, M., Khan, A., 2016. Bioaccumulation of heavy metals in different organs of *Wallago attu* from River Kabul Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Biological Trace Element Research* 172, 242–250.
- Sholupov, S., Pogarev, S., Ryzhov, V., Mashyanov, N., Stroganov, A., 2004. Zeeman atomic absorption spectrometer RA-915+ for direct determination of mercury in air and complex matrix samples. *Fuel Processing Technology* 85, 473–485. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2003.11.003>
- Soltani, N., Marengo, M., Keshavarzi, B., Moore, F., Hooda, P.S., Mahmoudi, M.R., Gobert, S., 2021. Occurrence of trace elements (TEs) in seafood from the North Persian Gulf: Implications for human health. *Journal of Food Composition and Analysis* 97, 103754. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103754>
- Sonesten, L., 2003. Fish mercury levels in lakes – adjusting for Hg and fish-size covariation. *Environmental Pollution* 125 (2), 255–265.

References

- Allen-Gil, S.M., Gubala, C.P., Landers, D.H., Lasorsa, B.K., Crecelius, E.A., Curtis, L.R., 1997. Heavy metal accumulation in sediment and freshwater fish in U.S. Arctic lakes. *Environmental Toxicology and Chemistry* 16, 733–741.
- Arantes, F.P., Savassi, L.A., Santos, H.B., Gomes, M.V.T., Bazzoli, N., 2016. Bioaccumulation of mercury, cadmium, zinc, chromium, and lead in muscle, liver, and spleen tissues of a large commercially valuable catfish species from Brazil. *Anais Da Academia Brasileira De Ciências* 88, 137–147.
- Bell, L., 2017. Mercury in women of child-bearing age in 25 countries. IPEN, Göteborg, Sweden, 69 p.
- Bloom, N.S., 1992. On the chemical form of mercury in edible fish and marine invertebrate tissues. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 49, 1010–1017.
- Borisov, M.Ya., Konovalov, A.F., Dumnich, N.V., 2019. Ryby v Vologodskoy oblasti [Fish in Vologda Oblast]. Port-Aprel' Publishing House, Cherepovets, Russia, 128 p. (In Russian).

- Chouvelon, T., Warnau, M., Churlaud, C., Bustamante, P., 2009. Hg concentrations and related risk assessment in coral reef crustaceans, molluscs and fish from New Caledonia. *Environmental Pollution* **157** (1), 331–340.
- Cottril, B., Dogilotti, E., Edier, L., Furst, P., 2012. Scientific Opinion on the risk for public health related to the presence of mercury and methylmercury in food. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). *EFSA Journal* **10** (12), 1–241.
- Croteau, M., Luoma, S.N., Stewart, A.R., 2005. Trophic transfer of metals along freshwater food webs: Evidence of cadmium biomagnification in nature. *Limnology and Oceanography* **50** (5), 1511–1519.
- Grandjean, P., Budtz-Jørgensen, E., 2007. Total imprecision of exposure biomarkers: Implications for calculating exposure limits. *American Journal of Industrial Medicine* **50** (10), 712–719.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D., 2001. Past: palaeontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologica Electronica* **1**, 1–49.
- Houston, M., 2011. Role of mercury toxicity in hypertension, cardiovascular disease, and stroke. *Journal of Clinical Hypertension* **13** (8), 621–627.
- Ivanova, E., Eltsova, L., Komov, V., Borisov, M., Tropin, N. et al., 2023. Assessment of the consumptive safety of mercury in fish from the surface waters of the Vologda region in northwestern Russia. *Environmental Geochemistry and Health* **45**, 863–879. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01254-4>
- Kalkan, H., Sisman, T., Kilic, D., 2015. Assessment of heavy metal bioaccumulation in some tissues of *Leuciscus cephalus* from Karasu River, Erzurum-Turkey. *Austin Journal of Environmental Toxicology* **1**, 1004.
- Komov, V.T., Pronin, N.M., Mendsaikhan, B., 2014. Soderzhanie rtuti v myshtsakh ryb reki Selengi i ozyor ee basseina [Mercury content in muscles of fish of the Selenga River and Lakes of its basin (Russia)]. *Biologiya vnutrennikh vod [Inland Water Biology]* **7**, 178–184. (In Russian).
- Li, P., Zhang, J., Xie, H., Liu, C., Liang, S., Ren, Y., Wang, W., 2015. Heavy metal bioaccumulation and health hazard assessment for three fish species from Nansi Lake, China. *Bulletin of Environment Contamination and Toxicology* **94**, 431–436.
- Myers, G.J., Davidson, P.W., Strain, J.J., 2007. Nutrient and methyl mercury exposure from consuming fish. *The Journal of Nutrition* **137** (12), 2805–2808.
- Milanov, D.R., Krstic, P.M., Markovic, V.R., Jovanovic, A.D., Baltic, M.B., Ivanovic, S.J., Baltic, Z.M., 2016. Analysis of heavy metals concentration in tissues of three different fish species included in human diet from Danube River. *Acta Veterinaria* **66**, 89–102.
- Nemova, N.N., Lysenko, L.A., Meshcheryakova, O.V., Komov, V.T., 2014. Rtut' v rybakh; biokhimicheskaya indikatsiya [Mercury in fish: Biochemical indication]. *Biosfera [Biosphere]* **6** (2), 176–186. (In Russian).
- Pal, M., Ghosh, M., 2013. Assay of biochemical compositions of two Indian fresh water el with special emphasis on accumulation of toxic heavy metals. *Journal of Aquatic Food Product Technology* **22**, 27–35.
- Rice, K.M., Walker, E.M., Wu, M., Gillette, C., Blough, E.R., 2014. Environmental mercury and its toxic effects. *Journal of Preventive Medicine and Public Health* **47** (2), 74–83.
- Siraj, M., Khisroon, M., Khan, A., 2016. Bioaccumulation of heavy metals in different organs of *Wallago attu* from River Kabul Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Biological Trace Element Research* **172**, 242–250.

- Sholupov, S., Pogarev, S., Ryzhov, V., Mashyanov, N., Stroganov, A., 2004. Zeeman atomic absorption spectrometer RA-915+ for direct determination of mercury in air and complex matrix samples. *Fuel Processing Technology* **85**, 473–485. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2003.11.003>
- Slynko Y.V., Tereshchenko, V.G., 2014. Ryby presnykh vod Ponto-Kaspiiskogo basseina (Raznoobrazie, faunogenez, dinamika populiatsii, mekhanizmy adaptatsii [Freshwater fishes of the Ponto-Caspian Basin (diversity, faunogenesis, population dynamics, adaptation mechanisms)]. POLIGRAF-PLUS, Moscow, Russia, 328 p. (In Russian).
- Soltani, N., Marengo, M., Keshavarzi, B., Moore, F., Hooda, P.S., Mahmoudi, M.R., Gobert, S., 2021. Occurrence of trace elements (TEs) in seafood from the North Persian Gulf: Implications for human health. *Journal of Food Composition and Analysis* **97**, 103754. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103754>
- Sonesten, L., 2003. Fish mercury levels in lakes – adjusting for Hg and fish-size covariation. *Environmental Pollution* **125** (2), 255–265.
- Stepanova, I.K., Komov, V.T., 1997. Nakoplenie rtuti v rybe iz vodoemov Vologodskoi oblasti [Accumulation of mercury in fish from water bodies of Vologda Oblast]. *Ekologiya [Ecology]* **4**, 295–299. (In Russian).