



Трансформация экосистем Ecosystem Transformation www.ecosysttrans.com

Пространственно-временная вариабельность содержания ртути в речном окуне *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 (Perciformes: Percidae) Рыбинского водохранилища на рубеже XX–XXI веков

В.А. Гремячих¹, Р.А. Ложкина¹, В.Т. Комов^{1,2*}

¹Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, 152742, Россия, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 109

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

*vkomov@ibiw.yaroslavl.ru

Поступила в редакцию: 16.08.2018

Принята к печати: 29.10.2018

Опубликована онлайн: 20.05.2019

DOI: 10.23859/estr-180816

УДК 597.583.1:574.64

URL: http://www.ecosysttrans.com/publikatsii/detail_page.php?ID=113

ISSN 2619-094X Print

ISSN 2619-0931 Online

Проведено исследование содержания ртути (Hg) в мышечной ткани речного окуня (*Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758) из разных плесов Рыбинского водохранилища в период с 1997 по 2012 г. Концентрации Hg в мышцах были выше у окуня из Шекснинского и Волжского плесов, ниже – из Главного и Моложского, так же, как и Hg в донных отложениях из мест обитания рыб. Отмечена зависимость значения показателя от размеров рыб и тенденция к его увеличению в последние десятилетия. Определено содержание ртути в различных органах и тканях окуня. Установлена положительная корреляционная зависимость между значениями показателя во всех исследованных образцах с концентрацией металла в мышечной ткани, в которой она была самой высокой (до 0.91 мг/кг сырой массы). Основная доля аккумулированной рыбой ртути приходится на мышцы.

Ключевые слова: водохранилища, аккумуляция ртути, донные отложения, ихтиофауна, абиотические и биотические факторы среды.

Гремячих, В.А., Ложкина, Р.А., Комов, В.Т., 2019. Пространственно-временная вариабельность содержания ртути в речном окуне *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 (Perciformes: Percidae) Рыбинского водохранилища на рубеже XX–XXI веков. *Трансформация экосистем* 2 (2), 85–95.

Введение

Поступление загрязняющих веществ в водные экосистемы продолжается, несмотря на совершенствование технологических процессов и наметившуюся в последние десятилетия тенденцию к снижению антропогенного влияния на окружающую среду (Моисеенко, 2009; Моисеенко и Гашкина, 2016; Hrabik and Watras, 2002). Проблема накопления ртути (Hg) в рыбе остается актуальной для многих водоемов северной части Европы

(Strandberg et al., 2016). Крупные водоемы России, представляющие собой не только транспортные артерии, источники минеральных ресурсов, объекты водоснабжения, рекреации, но и ресурсную базу спортивного и промыслового рыболовства, влияющую на формирование рациона питания населения, требуют особо пристального изучения. К категории таких водоемов относится одно из самых крупных водохранилищ Верхневолжского каскада – Рыбинское, в котором условия

обитания окуня в разных плесах различаются по гидрологическим, гидрохимическим показателям, составу и численности представителей разных трофических групп биологических сообществ, их распределению по акватории (Копылов, 2001; Лазарева, 2010; Литвинов и др., 2012).

Впервые высокие уровни накопления ртути в пресноводных водоемах северо-запада европейской части России были зарегистрированы в мышцах окуня, обитающего в малых (площадь водного зеркала менее 1 км²) ацидных озерах – до 3.04 мг/кг сырой массы (Haines et al., 1992; Stepanova and Komov, 1997). У окуня из водоемов с нейтральными значениями pH воды, к которым относятся почти все большие озера и водохранилища ($S > 30$ км²), концентрации ртути ниже в разы, но в некоторых случаях превышают 0.3 мг/кг (Гремячих и Комов, 2015). Такое содержание ртути может представлять риск для здоровья теплокровных животных, в рационе питания которых рыба является обязательным элементом (Scheuhammer et al., 2007; Wiener et al., 2007).

Речной окунь долгое время используется в качестве модельного представителя ихтиофауны при изучении закономерностей накопления ртути рыбой из водоемов и водотоков разной типологии (Комов и др., 2004). Вместе с тем представление об основных депонирующих ртуть органах или тканях у окуня к настоящему времени не сформировано. Кроме того, не выведено универсальной зависимости накопления металла рыбами из больших озер и водохранилищ от гидрохимических и гидробиологических условий.

Учитывая данные факты, были поставлены следующие задачи: 1) анализ пространственно-временной динамики концентраций ртути в мышцах окуня Рыбинского водохранилища и его плесов в последние десятилетия; 2) исследование распределения ртути по органам и тканям окуня для выделения основных и малозначимых по накоплению металла частей организма.

Материал и методы

На станциях Волжского, Главного, Моложского и Шекснинского плесов Рыбинского водохранилища в 1997–2012 гг. для последующего анализа содержания ртути были отобраны образцы донных отложений (ДО), сетями и неводом отловлен окунь (104 самки, 40 самцов и 5 ювенильных особей).

Образцы ДО отбирали дночерпателем и высушивали при температуре 39 °С в течение 3 сут. (Комов и др., 2017). Отлов рыбы, отбор проб и их хранение проводили по стандартной методике (Комов и др., 2004).

Выборки рыб были неоднородными по размерно-массовым показателям, поэтому в отдельных случаях при сравнительном анализе не учитывались рыбы массой более 100 г.

Для определения содержания ртути в разных тканях у 12 окуней из Волжского плеса массой от 7 до 947 г были отпрепарированы печень, почки, мышцы, сердце, желудок, селезенка, кишечник, гонады, мозг, жабры, глаза, кости головы и осевого скелета, чешуя, кожа и грудные плавники. Выделенные органы и ткани были взвешены (для определения доли массы органа от массы всего организма), и в них была определена концентрация ртути. На основании полученных данных рассчитали относительное (%) содержание Hg в органе от общего его количества в организме рыб.

Содержание ртути определяли в 2–3 повторностях атомно-абсорбционным методом холодного пара на ртутном анализаторе РА-915+ с приставкой ПИРО (Люмэкс) без предварительной подготовки проб. Точность аналитических методов измерения контролировали с использованием сертифицированного биологического материала DORM-2 и DOLM-2 (Институт химии окружающей среды, Оттава, Канада).

Результаты обрабатывали статистически, используя метод однофакторного и множественного дисперсионного анализа (ANOVA) и процедуру LSD-теста при уровне значимости $p < 0.05$ (Sokal and Rohlf, 1995). Данные представляли в виде средних значений и их ошибок ($\bar{x} \pm SE$). Для выявления корреляционных связей между исследуемыми показателями, значения которых в выборках не имеют нормального распределения (Shapiro-Wilk test), использовали непараметрический коэффициент Спирмена (r_s , $p < 0.05$).

Результаты

Содержание ртути в исследованных органах и тканях 12 экземпляров речного окуня варьировало от значений, лежащих ниже порога аналитического определения прибора, до 0.91 мг/кг. Средняя концентрация Hg имела максимальные значения (0.26 ± 0.06 мг/кг) в мышечной ткани, более низкие – в осевом скелете, костях головы и внутренних органах (0.03 – 0.18 мг/кг). Минимальные концентрации отмечены в мозге, грудных плавниках и чешуе (< 0.05 мг/кг сырой массы) (Табл. 1, Рис. 1). На мышцы приходилась максимальная доля в суммарной массе органов ($49.2 \pm 1.8\%$) и в общем количестве аккумулированного металла ($76.0 \pm 1.3\%$) (Табл. 1). Концентрация ртути в мышцах достоверно коррелировала с содержанием металла во всех исследованных органах и тканях, в большинстве случаев – статистически значимо (Табл. 2).

Концентрации Hg в мышцах окуня Рыбинского водохранилища за все время исследования варьировали в пределах 0.01 – 0.82 мг/кг сырой массы (Табл. 2). Выборки рыб по годам статистически значимо различались по длине, массе и по содержанию ртути в мышцах, которое положительно кор-

Табл. 1. Содержание и доля ртути в различных органах и тканях окуня от ее общего количества в организме. Над чертой – среднее \pm ошибка среднего; под чертой – минимальное и максимальное значения. Статистически значимые показатели выделены жирным шрифтом.

* – коэффициент корреляции содержания ртути в органе и общего количества ртути в мышцах.

№	Орган	Содержание ртути, мг/кг сырой массы	Доля массы органа от суммарной массы органов, %	Содержание ртути в органе от ее общего количества в органах, %	$r_s, p < 0,05^*$
1	мышцы	0.26 ± 0.06	49.2 ± 1.8	76.0 ± 1.3	1
		0.10–0.68	37.1–56.8	67.8–82.4	
2	сердце	0.18 ± 0.1	0.15 ± 0.01	0.12 ± 0.04	0.67
		0.001–0.91	0.09–0.24	0.001–0.37	
3	осевой скелет	0.14 ± 0.03	7.81 ± 0.29	8.17 ± 1.02	0.52
		0.05–0.46	6.43–9.62	2.01–13.02	
4	печень	0.12 ± 0.05	2.42 ± 0.17	1.49 ± 0.18	0.73
		0.03–0.80	1.60–4.00	0.66–3.03	
5	кости головы	0.09 ± 0.05	10.6 ± 0.5	4.91 ± 1.27	0.55
		0.02–0.59	8.5–14.3	0.24–14.15	
6	почки	0.09 ± 0.02	0.24 ± 0.03	0.11 ± 0.02	0.88
		0.03–0.25	0.08–0.49	0.06–0.22	
7	желудок	0.08 ± 0.02	0.92 ± 0.08	0.54 ± 0.07	0.72
		0.02–0.25	0.51–1.52	0.10–0.96	
8	селезенка	0.08 ± 0.02	0.15 ± 0.02	0.06 ± 0.01	0.86
		0.02–0.19	0.08–0.41	0.03–0.09	
9	кишечник	0.07 ± 0.02	1.00 ± 0.07	0.47 ± 0.11	0.66
		0.001–0.27	0.73–1.47	0.02–1.54	
10	гонады	0.05 ± 0.03	7.7 ± 2.3	1.80 ± 1.00	0.68
		0–0.35	0.49–26.08	0–12.19	
11	кожа	0.06 ± 0.01	7.12 ± 0.25	3.51 ± 0.62	0.39
		0–0.18	5.51–8.79	0–6.80	
12	жабры	0.05 ± 0.02	3.45 ± 0.21	1.30 ± 0.27	0.70
		0.001–0.19	2.32–4.57	0.03–3.25	
13	глаза	0.05 ± 0.01	1.56 ± 0.23	0.55 ± 0.15	0.75
		0.001–0.15	0.48–2.86	0.01–1.52	
14	мозг	0.04 ± 0.01	0.36 ± 0.08	0.07 ± 0.02	0.94
		0–0.10	0.06–0.84	0–0.21	
15	грудные плавники	0.04 ± 0.01	2.86 ± 0.11	0.71 ± 0.20	0.85
		0.03–0.14	1.86–3.65	0.12–2.51	
16	чешуя	0.03 ± 0.01	4.52 ± 0.52	1.13 ± 0.36	0.22
		0–0.10	2.45–10.43	0–3.98	

релирировало с массой окуня ($r_s = 0.96, p < 0.05$). У рыб из разных плесов водохранилища статистически значимых различий в значениях показателя не выявлено как при анализе данных по всем выборкам, так и при ограничении массы особей 100 г (Табл. 3), однако они были более высокими

в Шекснинском и Волжском плесах, ниже – в Главном и Моложском (Табл. 4).

Средняя концентрация ртути в мышцах окуня Рыбинского водохранилища за годы исследований увеличивалась: при анализе данных по всей выборке ($r_s = 0.29, p < 0.05$) и при ограничении массы

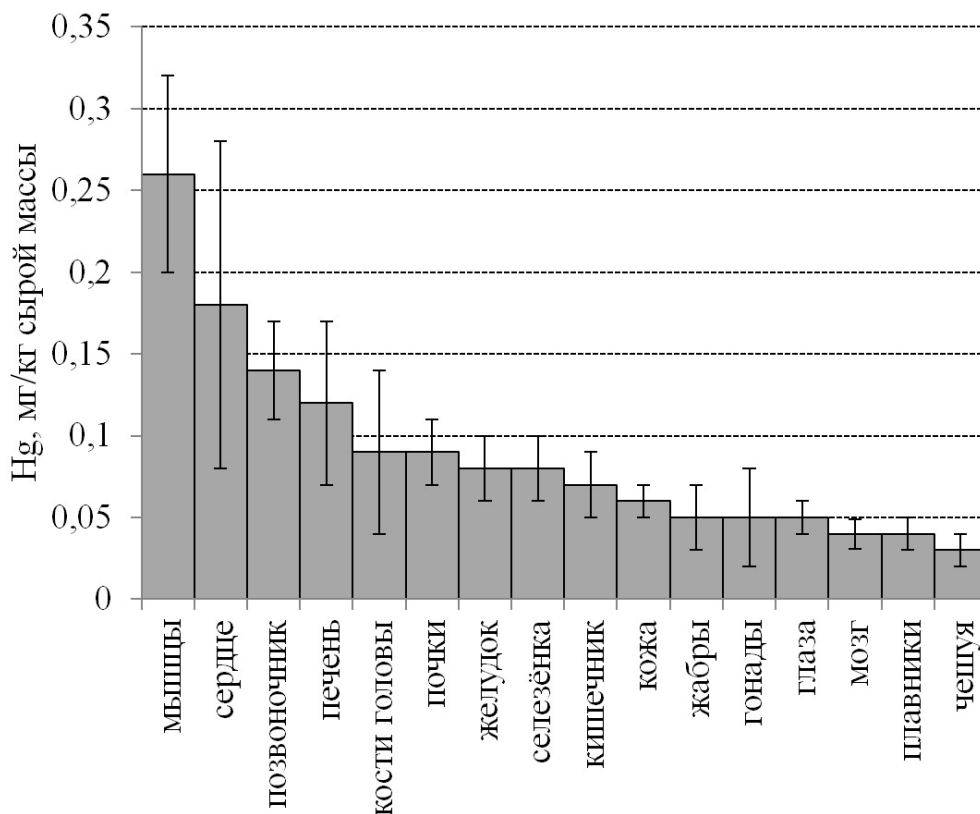


Рис 1. Среднее содержание ртути в различных органах и тканях речного окуня Рыбинского водохранилища.

анализируемых рыб до 100 г ($r_s = 0.37$, $p < 0.05$). Эта же тенденция сохранялась и по выборкам из Волжского, Главного и Моложского плесов, а для окуня из Шекснинского отмечено достоверное снижение значения показателя по всей выборке рыб ($r_s = -0.88$, $p < 0.05$) и для окуня массой до 100 г ($r_s = -0.95$, $p < 0.05$).

Содержание ртути в донных отложениях плесов Рыбинского водохранилища варьировало: в 2000 г. в пределах 0.02–0.07, в 2016 – 0.01–0.3 мг/кг сухой массы (Табл. 5). Оно было более высоким в ДО Шекснинского и Волжского плесов, ниже – в ДО Главного и Моложского. Установлена корреляция содержания ртути в окуне из разных плесов со значениями данного показателя в ДО ($r = 0.95$, $p < 0.047$), концентрациями азота ($N_{\text{общ.}}$), хлорофилла ($Chl_{\text{общ.}}$) и численности ветвистоусых рачков (Лазарева и др., 2012): $r = 0.91$ – 0.95 , $p < 0.1$.

Обсуждение результатов

Проведенное исследование показало, что минимальное содержание металла определено в мозге и гонадах, максимальное – в мышцах. Половые железы у рыб ежегодно формируются заново, поэтому их следует рассматривать как органы с наиболее высокой степенью самообновления (Немова, 2005; Svobodova et al., 1999). Мышцы составляют около половины массы тела рыб, в результате чего эта ткань содержит порядка 80% всей поступившей в организм ртути. В других ор-

ганах содержание металла значительно ниже из-за их меньшей массы. Высокие корреляционные связи между органами и тканями по показателю содержания в них ртути позволяют ориентировочно оценить концентрацию ртути в мышцах при наличии данных по грудным плавникам, жабрам, костям головы и осевого скелета. Это может быть полезным при работе с коллекционным материалом или при полевом сборе останков рыбы.

Результаты настоящего исследования совпадают с выводами ранее проведенных исследований, где рассматривались нелетальные подходы к оценке загрязнения ртутью водной среды с использованием рыб как индикаторов, а для получения данных применяли различные методы биопсии (Ackerson et al., 2014; Schmitt and Brumbaugh, 2007). Так, прогнозирование концентраций металла в мышцах рыб осуществляли по значениям показателя в плавниках (фрагментах плавников) (Cervenka et al., 2011; Cervený et al., 2016; Gremillion et al., 2005; Piraino and Taylor, 2013; Ryba et al., 2008). Статистически значимая корреляционная зависимость между содержанием металла в мышцах и плавниках создает дополнительные возможности для определения уровней ртутной нагрузки на водоемы с использованием окуня в качестве вида-индикатора. Ее наличие позволяет отслеживать происходящие со временем изменения в процессе аккумуляции металла рыбой и упрощает процедуру отбора проб.

Табл. 2. Среднее содержание ртути в мышцах окуня Рыбинского водохранилища (1997–2012 гг.). Над чертой – среднее \pm ошибка среднего; под чертой – минимальное и максимальное значения. n – количество исследованных рыб; L_2 – длина тела по Смитту (расстояние от вершины рыла до конца средних лучей хвостового плавника).

Год	n	L_2 , см	Масса, г	Содержание ртути, мг/кг сырой массы
1997	8	13.3 ± 0.7	27.1 ± 4.8	0.08 ± 0.03
		11.6–18.2	16.2–58.0	0.01–0.25
1998	18	17.3 ± 0.7	77.6 ± 14.1	0.20 ± 0.04
		13.5–26.5	29.9–297.6	0.01–0.58
1999	6	30.0 ± 1.1	461.7 ± 61.6	0.37 ± 0.03
		27.0–34.0	308–672.0	0.3–0.46
2000	9	12.8 ± 1.2	35.5 ± 7.8	0.04 ± 0.003
		5.2–19.5	16.5–95.4	0.03–0.06
2001	4	39.3 ± 2.1	1006.3 ± 78.9	0.44 ± 0.03
		35.0–45.0	850.0–1200.0	0.38–0.51
2002	13	30.5 ± 0.8	569.5 ± 68.8	0.35 ± 0.03
		27.5–37.0	400.0–1240.0	0.25–0.57
2003	2	42.3	1226.0	0.56
		42–42.5		0.4 и 0.72
2004	16	30.2 ± 1.0	493.5 ± 56.5	0.28 ± 0.05
		25.6–37.0	240.3–910.0	0.11–0.82
2005	4	18.5 ± 2.2	92.4 ± 32.0	0.14 ± 0.04
		15.0–24.2	43.3–178.8	0.08–0.25
2006	10	17.6 ± 0.9	81.3 ± 12.6	0.21 ± 0.02
		13.2–22.7	31.5–150.9	0.09–0.29
2008	14	18.8 ± 2.0	90.4 ± 18.4	0.17 ± 0.03
		3.5–33.3	3.0–209.7	0.03–0.39
2009	15	23.4 ± 1.7	278.5 ± 53.6	0.25 ± 0.04
		16.3–33.2	81.4–695.0	0.06–0.58
2010	13	40.4 ± 17.8	254.1 ± 68.0	0.26 ± 0.02
		13.5–244.6	26.8–969.0	0.13–0.41
2012	16	28.0 ± 1.7	351.1 ± 91.5	0.41 ± 0.04
		17.5–42.5	74.2–1543.0	0.18–0.68
За все годы	148	24.8–1.7	284.0 ± 25.4	0.25 ± 0.01
		3.5–244.6	3.0–1543.0	0.01–0.82

Максимальные концентрации ртути, согласно литературным данным, обнаруживаются в печени, почках, мышцах, скелете и сердечной ткани (Газина, 2005; Моисеенко, 2003; Попов и др., 2002; Cizdziel et al., 2003). В зависимости от вида рыб и объема проведенных работ исследованные органы и ткани в порядке снижения содержания в них ртути располагаются авторами по-разному:

печень > почки (Попов и др., 2002); печень > почки > скелет (Моисеенко, 2003); печень > мышцы > гонады > кровь (Cizdziel et al., 2003); сердце > жабры > мышцы > печень (Газина, 2005).

Установленная в настоящем исследовании зависимость содержания ртути от массы (размеров, возраста) окуня согласуется с данными других работ (Chen and Folt, 2005; Dang and Wang, 2012;

Hanna et al., 2015). Каннан с соавторами (Kannan et al., 1998) считают, что размеры тела играют особенно важную роль, поскольку, в отличие от других микроэлементов, накопление ртути в организме связано с длиной и массой рыб положительно. По мнению остальных упомянутых авторов, интенсивность биоконцентрации металла зависит от размеров (массы) рыб. Показано, что содержание ртути в пище молоди рыб невысоко, а быстрые темпы роста молоди снижают концентрации металла в их мышечной ткани в результате «ростового разбавления». Этот эффект у крупных экземпляров рыб менее выражен (темп роста ниже), а содержание ртути в добыче – выше (из-за увеличения ее размеров).

Сложная многокомпонентная экосистема Ры-

бинского водохранилища, взаимодействие большого числа абиотических и биотических факторов, до настоящего времени плохо контролируемых и даже не учитываемых, не позволили предложить простое объяснение повышению концентрации ртути в мышцах окуня в последние десятилетия, тем более что процессы аккумуляции металла протекали по-разному даже в отдельных частях водоема (песах).

По схожим причинам мониторинг содержания ртути в мышцах двух индикаторных видов (лещ, голавль) из пресноводных и эстуарных водоемов 5 европейских государств (Англия, Германия, Нидерланды, Франция и Швеция) в 2007–2013 гг. не позволил авторам сделать однозначный вывод о

Табл. 3. Среднее содержание ртути в мышцах окуня из разных плесов Рыбинского водохранилища в 1997–2012 гг. Над чертой – среднее \pm ошибка среднего; под чертой – минимальное и максимальное значения. n – количество исследованных рыб; L₂ – длина тела по Смитту (расстояние от вершины рыла до конца средних лучей хвостового плавника).

Плес	n	L ₂ , см	Масса, г	Содержание ртути, мг/кг сырой массы	Год
Волжский	12	16.50.6	62.9 \pm 7.7	0.16 \pm 0.02	1998
		13.5–20.5	30–123	0.04–0.27	
	4	13.0 \pm 0.4	31.6 \pm 3.6	0.03 \pm 0.003	2000
		12.0–13.5	24–38	0.03–0.04	
	5	38.8 \pm 1.7	985.4 \pm 64.6	0.45 \pm 0.03	2001
		35.0–45.0	850–1200	0.38–0.52	
	12	29.9 \pm 0.5	541.8 \pm 68.4	0.33 \pm 0.03	2002
		27.5–34.0	400–1240	0.25–0.57	
	11	28.8 \pm 1.2	422.8 \pm 69.4	0.29 \pm 0.06	2004
		25.6–37.0	240–910	0.11–0.82	
	8	23.6 \pm 1.5	137.5 \pm 17.3	0.26 \pm 0.03	2008
		20.0–33.3	58–210	0.09–0.39	
	15	23.4 \pm 1.7	278.5 \pm 53.6	0.25 \pm 0.04	2009
		16.3–33.2	81–695	0.06–0.58	
5	27.1 \pm 2.3	386.6 \pm 146.2	0.31 \pm 0.03	2010	
	24.5–36.5	226–969	0.26–0.41		
5	26.1 \pm 0.8	233.6 \pm 28.3	0.48 \pm 0.08	2012	
	24.0–29.0	185–340	0.21–0.68		
Главный	3	21.0 \pm 2.9	150.9 \pm 74.2	0.05 \pm 0.05	1998
		16.5–26.5	57–298	0.01–0.13	
	6	30.0 \pm 1.1	461.7 \pm 61.6	0.37 \pm 0.03	1999
		27–34	308–672	0.3–0.46	
	1	19.5	95.4	0.03	2000
	2	19.1	104.3	0.18	2010

Плес	n	L ₂ , см	Масса, г	Содержание ртути, мг/кг сырой массы	Год
Моложский	8	13.3 ± 0.7	27.1 ± 4.8	0.08 ± 0.03	1997
		11.6–18.2	16–58	0.01–0.25	
	4	10.9 ± 1.9	24.5 ± 3.0	0.04 ± 0.01	2000
		5.2–13.2	17–31	0.03–0.06	
	2	21.9 ± 2.4	140.2 ± 39.6	0.18 ± 0.08	2005
		19.5–24.2	101–180	0.1–0.25	
	10	17.6 ± 0.9	81.3 ± 12.3	0.21 ± 0.02	2006
		13.2–22.7	32–151	0.09–0.29	
	4	9.4 ± 2.1	17.0 ± 5.8	0.06 ± 0.02	2008
		3.5–12.5	3–28	0.02–0.1	
	6	22.0 ± 2.5	195.4 ± 66.2	0.25 ± 0.04	2010
		17.0–32.5	66–483	0.13–0.36	
	11	28.9 ± 2.4	404.5 ± 131.2	0.38 ± 0.04	2012
		17.5–42.5	75–1543	0.18–0.61	
Шекснинский	3	16.7 ± 0.6	63.1 ± 9.0	0.51 ± 0.07	1998
		15.6–17.7	54–81	0.36–0.58	
	2	42.3	1226	0.56	2003
	5	33.5 ± 0.8	488.8 ± 55.5	0.26 ± 0.06	2004
		31.3–36.0	488–830	0.18–0.49	
	2	15.1	44.6	0.11	2005
	2	18	49.2	0.05	2008

тенденциях в процессе биоконцентрации ртути. Тем не менее, результаты этих исследований послужили основанием для следующих заключений: стандарт качества окружающей среды ЕС (EQS) в 20 мкг/кг сырой массы был превышен на всех объектах и за все годы, за исключением одного озера в Германии в 2012 г. (Comission Regulation..., 2008); необходимы дальнейшие усилия по сокращению выбросов ртути как в атмосферу, так и непосредственно в воду (Nguetseng et al., 2015).

Установленная положительная зависимость содержания Hg в мышечной ткани окуня от значения показателя в ДО плесов водохранилища предполагает продолжение работ в этом направлении и более глубокий анализ проблемы, так как непонятно, отражает ли концентрация ртути в ДО водоема уровни накопления металла в населяющей его рыбе.

При изучении ДО и биоты эстуариев Южной Флориды (Kannan et al., 1998) была отмечена положительная корреляция между концентрациями общей и метилртути в мышцах нескольких видов морских рыб и моллюсков с концентрациями общей ртути в ДО.

Анализ распределения ртути в абиотических (вода, грунт) и биотических (зоопланктон, зообен-

тос, рыбы, птицы, млекопитающие) компонентах бессточных нейтральных и кислотных озер различной типологии на территории Дарвинского государственного заповедника показал отрицательную зависимость концентраций ртути в мышцах рыб от ее содержания в ДО. При этом максимально высокие концентрации металла в ДО были характерны для нейтральных озер, а в мышцах рыб – для кислотных (Степанова и Комов, 2004). Расхождение полученных результатов может быть связано с тем, что исследования проводились в водных экосистемах разного типа.

Зависимость содержания ртути в мышцах окуня от концентрации в воде ($N_{\text{общ.}}$, $Chl_{\text{общ.}}$) и численности ветвистоусых рачков можно оценить как тенденцию. Литературные данные по влиянию приведенных абиотических и биотических факторов на содержание Hg в рыбе противоречивы. По данным Финли с соавторами (Finley et al., 2016) содержание ртути в мышцах форели ручьевой (*Salvelinus fontinalis* Mitchell, 1814) отрицательно коррелировало со значениями pH воды и слабо положительно с уровнем трофности водоема, содержанием $P_{\text{общ.}}$.

В экспериментальном исследовании Эссингтона и Хаузера (Essington and Houser, 2003) внесе-

Табл. 4. Среднее содержание ртути в мышцах окуня с разных плесов Рыбинского водохранилища за весь период исследования. Над чертой – среднее \pm ошибка среднего; под чертой – минимальное и максимальное значения. n – количество исследованных рыб; L_2 – длина тела по Смитту (расстояние от вершины рыла до конца средних лучей хвостового плавника).

	Плес	n	L_2 , см	Масса, г	Содержание ртути, мг/кг сырой массы
Для всех рыб	Волжский	77	24.9 ± 0.8	328.9 ± 33.8	0.28 ± 0.02
			12.0–45.0	23.9–1240.0	0.03–0.82
	Главный	12	25.1 ± 1.8	293.9 ± 61.6	0.23 ± 0.05
			13.5–34.0	26.8–672.0	0.01–0.46
	Моложский	45	19.1 ± 1.3	157.7 ± 39.4	0.21 ± 0.02
			3.5–42.5	3.0–1543.0	0.01–0.61
	Шекснинский	14	26.3 ± 2.8	433.8 ± 118.6	0.30 ± 0.06
			15.0–42.5	22.1–1226.0	0.03–0.72
Для рыб массой до 100 г	Волжский	18	16.5 ± 1.1	55.5 ± 5.5	0.13 ± 0.02
			12.0–33.3	23.9–100.1	0.03–0.39
	Главный	4	17.4 ± 1.5	69.4 ± 17.0	0.06 ± 0.04
			13.5–20.1	26.8–97.9	0.01–0.17
	Моложский	30	17.4 ± 1.5	47.2 ± 5.6	0.12 ± 0.01
			13.5–20.1	3.0–100.6	0.01–0.27
	Шекснинский	7	16.6 ± 0.5	53.8 ± 7.6	0.26 ± 0.1
			15.0–18.0	22.1–81.	0.03–0.58

ние биогенов в водоемы (повышение трофности озер) способствовало росту желтого окуня (*Perca flavescens* Mitchell, 1814) и снижению концентрации ртути в его мышцах. По мнению авторов, на 30–40% это может быть связано с ростовым разбавлением и, в большей степени, с изменением рациона – переходом питания с бентосных беспозвоночных на планктонные.

В настоящей работе установлена положительная корреляционная зависимость между концентрацией металла в мышцах и численностью планктонных Cladocera. В исследованиях, проведенных на Волжских водохранилищах (в том числе и на Рыбинском) в последние годы XX в., уже было показано, что содержание ртути в мышцах окуня выше там, где зарегистрированы максимальные значения биомассы зоопланктона и минимальные – фитопланктона (Степанова и Комов, 2004). По данным Чэнь и Фолта (Chen and Folt, 2005), содержание ртути в фитопланктоне и разноразмерном зоопланктоне снижалось с увеличением их плотности, которую оценивали по концентрации Сl (мг/л) и численности гидробионтов (экз./л). Увеличение плотности фито- и зоопланктона отрицательно коррелировало с концентрацией Hg в мышечной ткани представителей мирных и хищных рыб.

Содержание ртути в мышцах окуня из Рыбинского водохранилища за период исследования

имело тенденцию к увеличению. Средние значения показателя для рыб из плесов статистически значимо не различались, но так же, как и в ДО, были выше в Шекснинском и Волжском плесах, ниже – в Главном и Моложском. Отсутствие каких-либо существенных закономерностей в процессе накопления ртути в рыбе от гидрохимических и гидробиологических показателей мест их обитания, вероятно, связано с тем, что сами эти показатели переменны и зависят от сезона и места отбора проб.

Незначительное изменение содержания Hg в мышцах окуня из Рыбинского водохранилища свидетельствует о стабильности показателя и возможности его использования для оценки степени ртутного загрязнения водных экосистем. Необходимым условием получения достоверного результата при сравнительном анализе выборок рыб из разных биотопов с разными биоценозами будет ограниченный разброс размерно-весовых показателей исследуемых особей, так как концентрации Hg в мышцах увеличиваются с ростом рыб.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что за последние десятилетия экосистема Рыбинского водохранилища находится в относительно устойчивом состоянии и не подвержена существенным воздействиям изменения внешней среды. В начале XXI в. уровень загрязнения ртутью

Табл. 5. Среднее содержание ртути (мг/кг сухой массы) в ДО разных плесов. Над чертой – среднее \pm ошибка среднего; под чертой – минимальное и максимальное значения. В скобках под чертой обозначено количество исследованных экземпляров рыб.

Год	Плес			
	Моложский	Главный	Волжский	Шекснинский
2000	0.05 ± 0.001	0.02 ± 0.001	0.29 ± 0.07	0.08 ± 0.005
	0.050–0.052 (4)	0.022–0.024 (3)	0.10–0.67 (4)	0.07–0.10 (6)
2016	0.06 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.16	0.19 ± 0.02
	0.01–0.14 (20)	0.02–0.07 (6)	0.15–0.16 (2)	0.14–0.28 (6)

не представляет серьезной опасности ни для экосистемы водохранилища, ни для людей, использующих в пищу рыбу из него.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Физиолого-биохимические и иммунологические реакции гидробионтов под действием биотических и абиотических факторов окружающей среды» (№ г/р АААА-А18-118012690123-4).

Список литературы

- Газина, И.А., 2005. Особенности распределения и накопления тяжелых металлов в органах и тканях рыб. *Известия Алтайского государственного университета. Серия Химия. География. Биология* 3, 90–93.
- Гремячих, В.А., Комов, В.Т., 2015. Содержание ртути в мышцах речного окуня из некоторых крупных озер России. *Сборник трудов Второго международного симпозиума «Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты»*. Новосибирск, Россия, 113–117.
- Комов, В.Т., Степанова, И.К., Гремячих, В.А., 2004. Содержание ртути в мышцах рыб из водоемов Северо-Запада России: причины интенсивного накопления и оценка негативного эффекта на состояние здоровья людей. В: Флерова, Б.А. (ред.), *Актуальные проблемы водной токсикологии*. ИБВВ РАН, Борок, Россия, 99–123.
- Комов, В.Т., Гремячих, В.А., Удоденко, Ю.Г., Щедрова, Е.В., Елизаров, М.Е., 2017. Ртуть в абиотических и биотических компонентах водных и наземных экосистем поселка городского типа на берегу Рыбинского водохранилища. В: Томила, И.И. (ред.), *Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы. Труды ИБВВ им. И.Д. Папанина РАН* 77 (80), 34–56.
- Копылов, А.И. (ред.), 2001. Экологические проблемы Верхней Волги. ЯГТУ, Ярославль, Россия, 427 с.
- Лазарева, В.И., 2010. Структура и динамика зоопланктона Рыбинского водохранилища. Товарищество научных изданий КМК, Москва, Россия, 183 с.
- Лазарева, В.И., Минеева, Н.М., Жданова, С.М., 2012. Пространственное распределение планктона в водохранилищах верхней и средней Волги в годы с различными термическими условиями. *Поволжский экологический журнал* 4, 394–407.
- Литвинов, А.С., Пырина, И.Л., Законнова, А.В., Кучай, Л.А., Соколова, Е.Н., 2012. Изменение термического режима и продуктивности фитопланктона Рыбинского водохранилища в условиях потепления климата. *Материалы докладов Всероссийской конференции «Бассейн Волги в XXI-м веке: структура и функционирование экосистем водохранилища»*, Борок, Россия, 22–26 октября 2012. ИП Пермьяков С.А., Ижевск, Россия, 108–112.
- Моисеенко, Т.И., 2003. Закисление вод: факторы, механизмы и экологические последствия. Наука, Москва, Россия, 276 с.
- Моисеенко, Т.И., 2009. Водная экотоксикология: теоретические и прикладные аспекты. Наука, Москва, Россия, 400 с.
- Моисеенко, Т.И., Гашкина, Н.А., 2016. Биоаккумуляция ртути в рыбах как индикатор уровня загрязнения вод. *Геохимия* 6, 495–504. <https://doi.org/10.7868/S0016752516060042>.
- Немова, Н.Н., 2005. Биохимические эффекты накопления ртути у рыб. Наука, Москва, Россия, 166 с.

- Попов, П.А., Андросова, Н.В., Аношин, Г.Н., 2002. Накопление и распределение тяжелых и переходных металлов в рыбах Новосибирского водохранилища. *Вопросы ихтиологии* **42**, 264–270.
- Степанова, И.К., Комов, В.Т., 2004. Роль трофической структуры экосистемы водоемов северо-запада России в накоплении ртути в рыбе. *Гидробиологический журнал* **40** (2), 87–96.
- Ackerson, J.R., Mckee, M.J., Schmitt, C.J., Brumbaugh, W.G., 2014. Implementation of a non-lethal biopsy punch monitoring program for mercury in smallmouth bass, *Micropterus dolomieu* Lacepede, from the eleven point river, Missouri. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **92**, 125–131. <https://doi.org/10.1007/s00128-013-1145-x>.
- Cervenka, R., Bednarik, A., Komarek, J., Ondrackova, M., Jurajda, P., Vitek, T., Spurny, P., 2011. The relationship between the mercury concentration in fish – muscles and scales/fins and its significance. *Central European Journal of the Chemical Society* **9**, 1109–1116. <https://doi.org/10.2478/s11532-011-0105-8>.
- Cerveny, D., Roje, S., Turek, J., Randak, T., 2016. Fish fin-clips as a non-lethal approach for biomonitoring of mercury contamination in aquatic environments and human health risk. *Chemosphere* **163**, 290–295. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.045>.
- Chen, C.Y., Folt, C.L., 2005. High plankton densities reduce mercury biomagnification. *Environmental Science & Technology* **39**, 115–121. <https://doi.org/10.1021/es0403007>.
- Cizdziel, J., Hinners, T., Cross, C., Pollard, J., 2003. Distribution of mercury in the tissues of five species of freshwater fish from Lake Mead, USA. *Environmental Monitoring and Assessment* **5**, 802–807. <https://doi.org/10.1039/B307641P>.
- Commission regulation (EC) No 629/2008 of 2 July 2008 amending Regulation (EC) No 1881/2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. *Official Journal of the European Union L* (173), 6–9.
- Dang, F., Wang, W.-X., 2012. Why mercury concentration increases with fish size? Biokinetic explanation. *Environmental Pollution* **163**, 192–198. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.026>.
- Essington, T.E., Houser, E.N., 2003. The Effect of Whole-Lake Nutrient Enrichment on Mercury Concentration in Age-1 Yellow Perch. *Transactions of the American Fisheries Society* **132** (1), 57–68. <https://doi.org/10.1577/000003703001320101>.
- Finley, M.L., Kidd, K.A., Curry, R.A., Lescord, G.L., Clauden, M.G., Driscoll, N.J., 2016. A comparison of mercury biomagnification through lacustrine food webs supporting brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and other salmonid fishes. *Frontiers in Environmental Science* 1–13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00023>.
- Gremillion, P.T., Cizdziel, J.V., Cody, N.R., 2005. Caudal fin mercury as a non-lethal predictor of fish-muscle mercury. *Environmental Chemistry* **2**, 96. <https://doi.org/10.1071/EN05018>.
- Haines, T.A., Komov, V.T., Jagoe, C.H., 1992. Lake acidity and mercury content of fish in Darwin National Reserve, Russia. *Environmental Pollution* **78**, 107–112. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(92\)90017-5](https://doi.org/10.1016/0269-7491(92)90017-5).
- Hanna, D.L., Solomon, C.T., Poste, A.E., Buck, D.G., Chapman, L.J., 2015. A review of mercury concentrations in freshwater fishes of Africa: patterns and predictors. *Environmental Toxicology and Chemistry* **34** (2), 215–223. <https://doi.org/10.1002/etc.2818>.
- Hrabik, T.R., Watras, C.J., 2002. Recent declines in mercury concentration in a freshwater fishery: isolating the effects of de-acidification and decreased atmospheric mercury deposition in Little Rock Lake. *The Science of the Total Environment* **297**, 229–237. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00138-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00138-9).
- Kannan, K., Smith, R.G. Jr., Lee, R.F., Windom, H.L., Heitmuller, P.T., Macauley, J.M., Summers, J.K., 1998. Distribution of Total Mercury and Methyl Mercury in Water, Sediment, and Fish from South Florida Estuaries. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **34**, 109–118.
- Nguetseng, R., Fliedner, A., Knopf, B., Lebreton, B., Quack, M., Rudel, H., 2015. Retrospective monitoring of mercury in fish from selected European freshwater and estuary sites. *Chemosphere* **134**, 427–434. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.04.094>.
- Piraino, M.N., Taylor, D.L., 2013. Assessment of nonlethal methods for predicting muscle tissue mercury concentrations in coastal marine fishes. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **65**, 715–723. <https://dx.doi.org/10.1007%2Fs00244-013-9946-9>.
- Ryba, S.A., Lake, J.L., Serbst, J.R., Libby, A.D., Ayvazian, S., 2008. Assessment of caudal fin clip as a non-lethal technique for predicting muscle tis-

- sue mercury concentrations in largemouth bass. *Environmental Chemistry* **5** (3), 200–203. <https://doi.org/10.1071/EN08017>.
- Scheuhammer, A.M., Meyer, M.W., Sandheinrich, M.B., Murray, M.W., 2007. Effects of environmental methylmercury on health of wild birds, mammals, and fish. *Ambio* **36**, 12–18. [https://doi.org/10.1579/0044-7447\(2007\)36\[12:EOEMOT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[12:EOEMOT]2.0.CO;2).
- Schmitt, C.J., Brumbaugh, W.G., 2007. Evaluation of potentially nonlethal sampling for monitoring mercury concentrations in smallmouth bass (*Micropterus dolomieu*). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* **53**, 84–95. <https://doi.org/10.1007/s00244-006-0214-0>.
- Sokal, R.R., Rohlf, F.J., 1995. Biometry: the principals and practice of statistics in biological research. W.H. Freeman and Co, New York, USA, 887 p.
- Stepanova, I.K., Komov, V.T., 1997. Mercury accumulation in fish from water bodies of the Vologodscaja Oblast. *Russian Journal of Ecology* **28** (4), 260–264.
- Strandberg, U., Palviainen, M., Eronen, A., Piirainen, S., Lauren, A., Kankaala, P., 2016. Spatial variability of mercury and polyunsaturated fatty acids in the European perch (*Perca fluviatilis*). Implications for risk-benefit analyses of fish consumption. *Environmental pollution* **219**, 305–314. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.050>.
- Svobodova, Z., Dušek, L., Hejtmanek, M., Vykusova, B., Šmid R., 1999. Bioaccumulation of Mercury in Various Fish Species from Orlik and Kamyk Water Reservoirs in the Czech Republic. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **43**, 231–240. <https://doi.org/10.1006/eesa.1999.1783>.
- Wiener, J.G., Bodaly, R.A., Brown, S.S., Lucotte, M., Newman, M.C., Porcella, D.B., Reash, R.J., Swain, E.B., 2007. Monitoring and evaluating trends in methylmercury accumulation in aquatic biota. In: Harris, R., Krabbenhoft, D.P., Mason, R.F., Murray, M.W., Reash, R.J., Saltman T. (eds.), *Ecosystem Responses to Mercury Contamination: Indicators of Change*. Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Pensacola, Florida, USA, 87–122. <https://doi.org/10.1201/9780849388897.ch4>.

Spatial-temporal variability of mercury content in the river perch *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 (Perciformes: Percidae) of the Rybinsk Reservoir at the turn of the XX–XXI centuries

Vera A. Gremyachikh¹, Rosa A. Lozhkina¹,
Victor T. Komov^{1,2*}

¹*I.D. Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok 109, Nekouz District, Yaroslavl region, 152742 Russia*

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

*vkomov@ibiw.yaroslavl.ru

The amount of mercury (Hg) in the muscle tissue of the river perch (*Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758) from different stretches of the Rybinsk reservoir was measured in a period from 1997 to 2012. Mercury concentrations were higher in muscles of perches from the Sheksna and Volga reaches, and lower in the Glavnyi and Mologa reaches, as well as Hg in bottom sediments from fish habitats. These values are shown to depend on the size of the fish and were found to increase in recent decades. The amount of mercury was determined in various organs and tissues of the perch. A positive correlation was established between the mercury content in all the studied samples and the mercury concentration in the muscle tissue in which it was the highest (up to 0.91 mg/kg wet weight). The bulk of the accumulated mercury present in the fish was found to be in the muscle tissue.

Keywords: reservoirs, accumulation of mercury, bottom sediments, ichthyofauna, abiotic and biotic environmental factors.