

УДК 597.2/.5–574.2

СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ МИРНЫХ И ХИЩНЫХ РЫБ РЕКИ ИРТЫШ

С.С. Эйрих, Л.В. Колотушкина, Т.Г. Серых

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул,**E-mail: steyrikh@gmail.com, lilichkashol661@gmail.com, tangers62@gmail.com*

Рыбы являются широко используемым объектом исследования окружающей среды, прежде всего из-за употребления их в пищу человеком. Вместе с тем они являются интегральным показателем состояния как пресноводных, так и морских водных экосистем, поскольку накапливают загрязнение за относительно продолжительный период времени и отражают биодоступность тяжелых металлов (ТМ) и особенности их накопления в конкретных водных экосистемах. Определение современных уровней содержания ТМ в мышцах рыб р. Иртыш, мирных и хищных видов, показало, что содержания Pb, Cd и Hg не превышают нормативов, установленных СанПиН 2.3.2.1078–01 для рыбы и продуктов из нее, таким образом, в настоящее время риска потребления рыбы, обитающей в р. Иртыш на изучаемом участке, не обнаружено. Полученные данные согласуются с ретроспективными и современными результатами исследования экологического состояния водоемов бассейна р. Оби, хотя в целом характеризуются более низкими концентрациями ТМ. Среди изученных видов рыб наибольшими концентрациями ТМ отличается ерш. Рассчитанные для различных видов рыб коэффициенты биоаккумуляции (BAF) показали, что максимальные аккумулирующие свойства проявляет ртуть, особенно в хищных видах и бентофагах, Zn проявляет потенциал для биоаккумуляции в отдельных видах, тогда как для Al, Cu и Ni биоаккумуляции не наблюдается. BAF в хищных видах примерно в 5 раз выше по сравнению с мирными для Hg, Ni и Al.

Ключевые слова: тяжелые металлы; рыба; хищные и мирные виды; коэффициенты биоаккумуляции; река Иртыш.

DOI:10.24412/2410-1192-2024-17306

Дата поступления: 29.08.2023. Принята к печати: 1.04.2024

Тяжелые металлы, поступая в водные и связанные с органическим веществом) экосистемы, в зависимости от форм аккумулироваться организмами гидро- их нахождения и физико-химических бионтов. Особенно это важно для таких условий, могут транспортироваться в высокотоксичных металлов, как Hg, Cd и растворенных формах, депонироваться в Pb, относящихся к 1 и 2 классам опасности. донных отложениях, а также, находясь в Река Иртыш является одной из подвижных формах (легкорастворимые, важнейших трансграничных рек России со обменные формы, сорбированные на сложной водохозяйственной обстановкой. поверхности оксидов железа и марганца В рамках реализации проекта «Научные

исследования по изучению динамики содержания химических веществ и изменчивости состояния водных экосистем в бассейне трансграничной реки Иртыш (Ертис) с целью разработки научно-обоснованных рекомендаций по оценке качества воды и состояния водных объектов по гидрохимическим показателям для трансграничных участков рек бассейна реки Иртыш (Ертис)», исходя из особенностей природной обстановки и специализации отраслей хозяйства, было установлено, что в бассейне р. Иртыш наиболее опасными потенциальными загрязняющими веществами являются соединения тяжелых металлов, прежде всего ртути, свинца и кадмия [Аналитический отчет, 2022]. Это определило необходимость получения аналитических данных об уровнях их накопления по отдельным составляющим водных экосистем (вода, донные отложения и биота) реки Иртыш. В настоящее время поверхностные воды реки Иртыш являются источником хозяйственно-питьевого, промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения, используются для целей рекреации, а также имеют рыбохозяйственное назначение, относясь к водотокам высшей категории [ГОСТ 17.1.2.04-77; Приказ..., 2020]. В биоценозах водных экосистем рыбы интегрируют неблагоприятные воздействия загрязняющих веществ, накапливая некоторые из них по пищевым цепям, поэтому они часто используются в качестве индикаторов оценки экологического состояния водоема [Моисеенко, Гашкина, 2016; Łuczynska et al., 2018]. Кроме того, содержание

токсичных тяжелых металлов (Pb, Cd, Hg, As) в рыбе строго контролируется из-за ее употребления в пищу человеком [СанПиН 2.3.2.1078–01; Derew et al., 2013; Azaman et al., 2015; Чугунова, Бурдина, 2019].

Материалы и методы

Отбор проб речной воды, донных отложений и гидробионтов проводился в 2022 г. в течение тёплого периода года с июня по сентябрь в трех створах наблюдений на р. Иртыш: выше с. Татарка, выше и ниже г. Омска (рис. 1).

Створ выше с. Татарка. Расположен вблизи государственной границы Российской Федерации и Республики Казахстан, выше с. Татарка Черлакского района Омской области. Пойма реки на исследуемом участке односторонняя левобережная. Пойменные протоки, являющиеся второстепенными по водности, расчлениают дно долины, создавая пойменную многорукавность. Русло р. Иртыш на данном участке разделено на 2 рукава с образованием трех островов посередине. Ширина левого рукава составляет около 190 м, правого – около 120 м. Ширина островов составляет 200–300 м. Левый берег на исследуемом участке пологий, густо заросший древесной и кустарниковой растительностью. Правый берег обрывистый с узкой прибрежной полосой.

Створ выше г. Омска. Расположен около п. Новая Станица (микрорайон г. Омска). Пойма реки на исследуемом участке практически не развита. Левый берег пологий, заросший древесной и кустарниковой растительностью. Правый берег высокий, обрывистый с достаточно широким песчано-щебнистым пляжем.

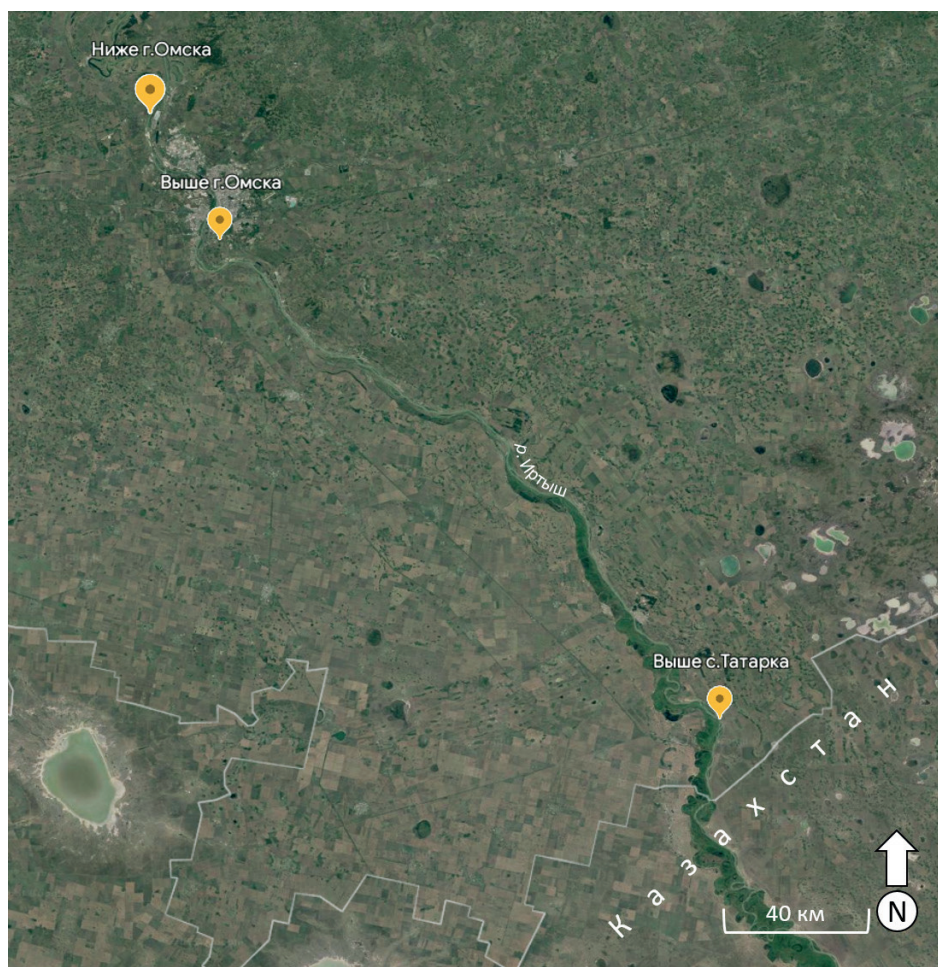


Рис. 1. Карта-схема мест отбора проб на р. Иртыш
Fig. 1. Sampling location map of the Irtysh River

Речные наносы на середине створа берега заиленным песком и серым илом. представлени песками, у левого берега мелким заиленным песком, у правого берега – песчано-щебнистым грунтом.

Створ ниже г. Омска. Расположен около с. Красная Горка, ниже г. Омска. Пойма реки на исследуемом участке не развита. Левый берег пологий, заросший древесной растительностью, преимущественно ивой. На участке отбора проб русло р. Иртыш разделено на 2 рукава. Ширина левого рукава составляет около 280 м, правого – около 120 м. Ширина острова – около 470 м. Речные наносы у левого берега представлены песчано-щебнистым грунтом, на середине створа мелким песком, у правого

Пробы воды отобраны с моторной лодки зачерпыванием из приповерхностного горизонта при глубине в местах отбора проб менее 4 м. Выполнен сбор рыб для определения содержания ТМ, изучено 6 видов рыб: щука, ерш, лещ, елец, пелядь и уклейка (табл. 1). Материалом для исследований являлись пробы мышечной ткани, которые отбирали со спинной части тела рыб. В каждом образце рыбы были взяты 3 параллельные пробы, масса навески составляла 0.3–0.8 г. Микроволновое кислотное разложение образцов тканей производили в установке MARS-5 с азотной кислотой.

Таблица 1

Отбор проб рыб в створах р. Иртыш

Table 1

Fish sampling in the sections of the Irtysh River

Название вида рыб		Тип питания	Дата отбора	Характеристики створа
русское	латинское			
выше с. Татарка				
Щука	<i>Esox lucius</i>	хищ.	20.07.2022	Оценка поступления загрязняющих веществ с территории Республики Казахстан
Елец	<i>Leuciscus leuciscus</i>	мир.	20.07.2022	
Лещ	<i>Abramis brama</i>	мир./бентофаг	10.08.2022	
Ерш	<i>Gymnocephalus cernuus</i>	хищ./бентофаг	14.09.2022	
выше г. Омска				
Лещ	<i>Abramis brama</i>	мир./бентофаг	21.06.2022	Фоновый створ, не испытывающий влияния г. Омска.
Пелядь	<i>Coregonus peled</i>	мир.	21.06.2022	
Ерш	<i>Gymnocephalus cernuus</i>	хищ./бентофаг	21.06.2022	
Уклейка	<i>Alburnus alburnus</i>	мир.	19.07.2022	
Лещ	<i>Abramis brama</i>	мир./бентофаг.	23.08.2022	
ниже г. Омска				
Елец	<i>Leuciscus leuciscus</i>	мир.	21.06.2022	Оценка влияния г. Омска на загрязнение р. Иртыш.
Уклейка	<i>Alburnus alburnus</i>	мир.	21.07.2022	
Ерш	<i>Gymnocephalus cernuus</i>	хищ./бентофаг	15.09.2022	

Содержание тяжелых металлов определяли с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой iCAP Qc (Thermo Fisher Scientific, Germany) в соответствии с методикой МУК 4.1.1483-03 [2003]. Содержание ртути определяли методом холодного пара с использованием анализатора ртути Mercur DUO Plus (Analytik Jena AG, Germany). Для контроля правильности использовали референсные образцы, а для контроля чистоты процедуры разложения и анализа – «холостые» пробы. Компетентность лаборатории и достоверность получаемых результатов подтверждена участием в программе проверки квалификации: МСИ по определению показателей состава рыбы ОК 222-РЫБ-04/2022 (определение массовой доли свинца, кадмия и мышьяка) и Пищевые продукты (Рыба) ОК РТР.16-23 (определение массовой концентрации ртути).

Результаты и их обсуждение

Согласно ГОСТ 17.1.2.04-77 «Охрана природы. Гидросфера. Правила таксации рыбохозяйственных водных объектов» река Иртыш считается водным объектом высшей категории рыбохозяйственного значения [ГОСТ 17.1.2.04-77]. Поскольку в водных экосистемах тяжелые металлы находятся в растворенной и взвешенной формах, и именно растворенная ионная форма является наиболее биодоступной и токсичной, то в соответствии с Приказом № 552 Министерства сельского хозяйства РФ [Приказ..., 2016] предельно допустимые уровни содержания тяжелых металлов в воде водных объектов рыбохозяйственного значения установлены для «растворимых в воде форм». Общепринято, что к взвешенному веществу рек относятся суспензированные в водном потоке твердые частицы размером больше 0.45 мкм, а к

растворенным формам – всё, что проходит через фильтр с размером пор 0.45 мкм. Выполненные исследования природной воды р. Иртыш на изученном участке от с. Татарка до створа, расположенного ниже г. Омска, показало отсутствие превышений нормативов, установленных для водоемов рыбохозяйственного значения ($ПДК_{р/х}$) в течение всего периода наблюдения для всех металлов, кроме меди, для которой значения были близки к $ПДК_{р/х}$, а в паводковый период наблюдалось незначительное превышение $ПДК_{р/х}$ (до 1.8 раза), что, прежде всего, связано с необоснованно низким нормативом, установленным для меди ($ПДК_{р/х}=1$ мкг/л). Концентрации тяжелых металлов в фильтрованных пробах речной воды, отобранных в р. Иртыш в августе 2022 г., вместе с соответствующими $ПДК_{р/х}$ представлены в таблице 2.

Несмотря на то, что большинство металлов в малых количествах необходимы для нормального функционирования гидробионтов, в более высоких концентрациях они являются токсичными. Железо, медь, цинк и марганец относятся

к эссенциальным элементам [Скальный и др., 2005], никель – к условно-эссенциальным и их уровни содержания в рыбах не нормируются [СанПиН 2.3.2.1078–01]. Наибольшую экологическую опасность представляют не-эссенциальные элементы, такие как Cd, Pb, As и Hg [Renieri et al, 2014], которые могут депонироваться в организме или включаться в метаболические процессы, оказывая токсичное воздействие на организм [Шульгин и др., 2007; Агбалян и др., 2019]. Многие исследователи также относят к неэссенциальным элементам Al из-за токсичных свойств его ионных форм [Closset et al., 2021]. Алюминий способен накапливаться в организме рыб при условии высокого содержания элемента в воде, включая ионную и взвешенную формы [Моисеенко, 2015].

Гидробионты разных трофических уровней являются широко используемыми биоиндикаторами загрязнения водной среды на отдельных ее участках. При этом рыбы, являясь мигрирующими организмами, дают интегральную характеристику загрязнения водного объекта.

Таблица 2

Концентрации растворенных форм тяжелых металлов в воде р. Иртыш в августе 2022 г.

Table 2

Concentrations of dissolved forms of heavy metals in the river water of the Irtysh in August 2022

металлы	Результаты испытаний, мкг/л (*нг/л)				$ПДК_{р/х}$, мкг/л (*нг/л)	НД на метод анализа
	выше с. Татарка	выше г. Омска	ниже г. Омска	среднее		
алюминий	0.8±0.1	3.3±0.2	2.3±0.1	2.1	40	ГОСТ Р 56219-2014
кадмий	0.04±0.01	0.04±0.01	0.022±0.004	0.034	5	
медь	0.96±0.05	0.90±0.05	0.88±0.08	0.91	1	
никель	3.4±0.2	3.2±0.2	2.8±0.2	3.1	10	
свинец	0.06±0.003	0.18±0.01	<0.01	0.08	6	
цинк	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	10	US EPA 1631e
ртуть*	2.1±0.4	2.4±0.5	2.9±0.6	2.5	10	

Иртыш в пределах Омской области имеет слаборазвитую пойму, заливаемую очень редко, поэтому большое значение в формировании численности различных рыб принадлежит протокам, в которых благодаря хорошей прогреваемости и высокому содержанию органических веществ создаются благоприятные условия для развития кормовой базы рыб. Прибрежная часть реки Иртыш используется рыбами для нагула. На р. Иртыш у с. Татарка (Черлакский район) расположена Малоатмасская зимовальная яма [Приложение..., 2022]. Исследованиями, проводимыми в разные годы СибрыбНИИпроектом, Омской областной инспекции рыбоохраны, а также Омским филиалом ФГУ «Верхнеобьрыбвод» установлено, что в границах Омской области обитают следующие виды рыб: осетровые (осетр, стерлядь), лососевые (нельма), карповые (язь, елец, плотва, лещ, пескарь), окуневые (окунь, ерш, судак). При этом 2 вида рыб являются запретными для добычи (вылова), так как относятся к особо ценным (осетр сибирский) и ценным (нельма) видам водных биоресурсов.

В данной работе изучены 6 видов рыб, из которых 2 отнесены к хищным (щука, ерш) и 4 к мирным (лещ, елец, пелядь, уклея). Следует заметить, что для ерша характерно смешанное питание, он относится к видам, способным адаптировать свой рацион, исходя из имеющихся пищевых ресурсов, некоторые исследователи относят его к эврифагам [Gutsch et al., 2016; Науменко и др., 2020; Cera et al., 2021]. Концентрацию ТМ

определяли в особях рыб, вес и размеры которых находились в пределах 8.5–132.5 г и 11–29 см. Исследуемые экземпляры были представлены несколькими возрастными группами: годовики, двух- и трехгодовики. В образцах рыбы определяли эссенциальные (Cu, Zn), условно-эссенциальные (Ni) и неэссенциальные (Al), в том числе наиболее токсичные (Hg, Pb, Cd) элементы. Средние концентрации ТМ для различных видов рыб представлены в таблице 3.

Предельно допустимые уровни ТМ в биологических объектах и продуктах нормируются СанПиН 2.3.2.1078–01 от 2002 года (с изменениями и дополнениями) [СанПиН 2.3.2.1078–01], согласно которому они нормируются в рыбе только для наиболее токсичных металлов: свинец – 1.04 мкг/г, мышьяк – 1.04 мкг/г, кадмий – 0.24 мкг/г, ртуть – 0.3 мкг/г (пресноводная нехищная), 0.6 мкг/г (пресноводная хищная) и 0.15 мкг/г (для продуктов детского питания, приготовленных из рыбы). Результаты определения показали, что ни в одной из исследованных проб рыбы эти уровни не превышены. Свинец и кадмий практически во всех пробах рыб находился ниже предела обнаружения метода (<0.01 мкг/г), для ртути диапазоны концентраций составили: 0.007 – 0.084 мкг/г для мирных и 0.007–0.117 мкг/г для хищных видов рыб, причем максимальные концентрации отмечены в образцах ершей, а минимальные – в образцах ельца и пеляди (0.007 мкг/г). Среди мирных рыб наибольшими концентрациями отличался лещ, относясь, как и ерш, к бентофагам и накапливая ртуть в большей степени по сравнению с другими мирными видами.

Таблица 3

Концентрации тяжелых металлов в мышечной ткани рыб различных видов,
выловленных в р. Иртыш в 2022 г.

Table 3

The average concentrations of heavy metals in the muscle tissue of various fish species caught
in the Irtysh River in 2022

Вид	Тип питания	Концентрация металлов, мкг/г*							Количество проб, n
		Cu	Ni	Zn	Hg	Pb	Cd	Al	
Щука	хищные	0.1	0.04	1.2	0.023	<0.01	<0.01	1.5	1
Ерш		<u>0.23–0.30</u> 0.28	<u>0.04–1.6</u> 0.65	<u>7.1–9.0</u> 8.3	<u>0.007–0.117</u> 0.075	<u><0.01–0.022</u> 0.012	<0.01	5.0	3
Лещ	мирные	<u>0.09–0.10</u> 0.10	<u>0.04–0.06</u> 0.05	<u>1.2–3.2</u> 2.2	<u>0.023–0.084</u> 0.043	<0.01	<0.01	<u><0.4–1.9</u> 1.1	3
Елец		<u>0.20–0.80</u> 0.50	<u>0.08–0.11</u> 0.1	<u>6.0–8.0</u> 7.0	<u>0.007–0.009</u> 0.008	<0.01	<0.01	<u><0.4–0.7</u> 0.45	2
Пелядь		0.10	0.05	2.6	0.007	<0.01	<0.01	<0.4	1
Уклейка		<u>0.10–0.12</u> 0.11	<u>0.13–0.18</u> 0.16	<u>5.0–7.0</u> 6.0	<u>0.010–0.012</u> 0.011	<0.01	<0.01	<u><0.4–1.1</u> 0.65	2

*в числителе – диапазон варьирования концентраций, в знаменателе – среднее арифметическое значение

Результаты определения ТМ в рыбах р. Иртыш, представленные на рис. 2, наглядно демонстрируют увеличение концентраций с повышением трофического уровня от мирных к хищным рыбам для таких металлов как Hg, Al, Ni, тогда как для остальных – тенденции не выявлено (Cu), превышение незначительно (Zn), либо концентрации были ниже пределов обнаружения (Cd, Pb). Это хорошо согласуется с многочисленными исследованиями для ртути, показавшими, что хищные виды, такие как форель, щука, окунь, в пресных водах и тунец, акула в океанических, содержат значительно более высокие уровни, чем нехищные [Комов и др., 2004; Depew et al., 2013; Попов, Андросова, 2014; Sun et al., 2020].

Для количественной оценки био-

аккумуляции используют коэффициент биоаккумуляции (BAF), который представляет собой отношение содержания металла в организме рыб (мкг/кг) к его общей концентрации в воде (мкг/л). Поскольку рыбы накапливают загрязняющие вещества в течение длительного периода и являются мигрирующими организмами, то BAF рассчитывали относительно среднегодовой концентрации металла в воде, усредненной по 3 створам изучаемого участка. Коэффициенты биоаккумуляции для ТМ, концентрации которых в пробах рыбы, либо пробах воды были ниже предела обнаружения метода (Cd, Pb) – не рассчитывали. Рассчитанные для различных видов рыб коэффициенты биоаккумуляции представлены в табл. 4.

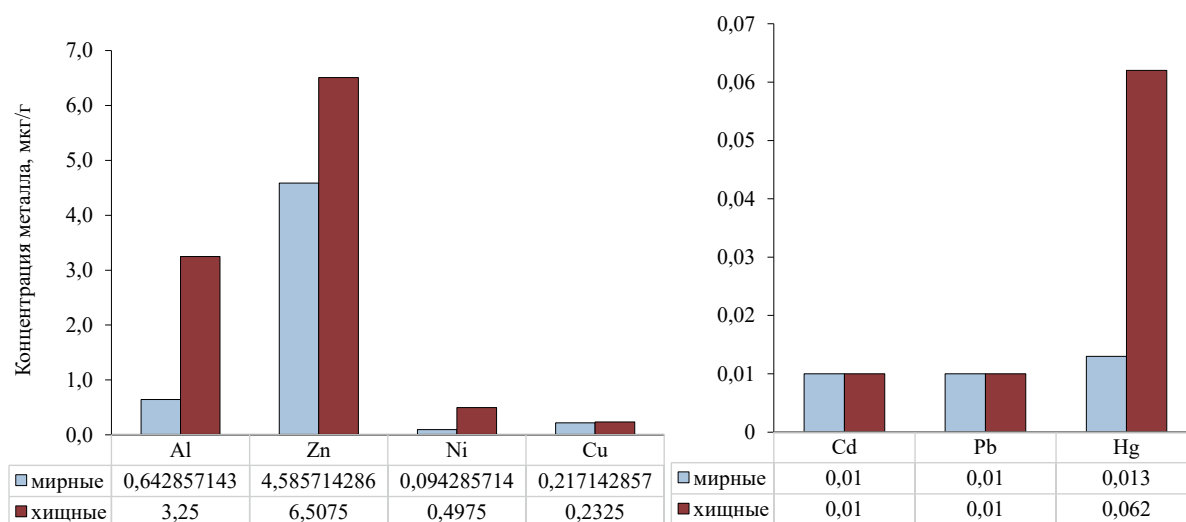


Рис. 2. Средние концентрации металлов (мкг/г) в образцах рыб мирных и хищных видов, отловленных в р. Иртыш в 2022 г.

Fig. 2. Average metal concentrations ($\mu\text{g/g}$) in fish samples of predatory and non-predatory species caught in the Irtysh River in 2022

Результаты показали, что в целом для всех видов рыб наименьшая степень аккумуляции тяжелых металлов наблюдается для алюминия, максимальная – для ртути, представляя следующий ряд накопления тяжелых металлов: $\text{Al} < \text{Cu} = \text{Ni} < \text{Zn} < \text{Hg}$. В соответствии с [Arnot, Gobas, 2006] при $\text{BAF} < 1000$ не наблюдается биоаккумуляции, потенциально биоаккумулятивным считается $1000 \leq \text{BAF} \leq 5000$, и биоаккумуляция

выражена при $\text{BAF} \geq 5000$. Таким образом, в рыбах на изученном участке Иртыша биоаккумуляции Al, Cu и Ni не наблюдается, Zn проявляет потенциал для биоаккумуляции в отдельных видах, тогда как Hg демонстрирует высокую степень биоаккумуляции для хищных рыб (щука) и особенно бентофагов (ерш, лещ), и потенциал для биоаккумуляции для планктофагов (пелядь, уклейка, елец).

Таблица 4
Коэффициенты биоаккумуляции (BAF) в различных видах рыб р. Иртыш

Table 4

Bioaccumulation coefficients (BAF) in various fish species in the Irtysh River

Вид рыбы	Тип питания	Cu	Ni	Al	Zn	Hg
щука	хищные	40	9	14	239	9310
ерш		112	146	47	1651	30360
лещ	мирные	40	11	10	438	17406
елец		80	23	4	1393	3238
пелядь		40	11	4	517	2834
уклейка		44	6	6	1194	4453
среднее	для всех рыб (n=12)	53	51	11	1017	14269

Сравнение коэффициентов аккумуляции для мирных и хищных рыб, приведенное на рис. 3, наглядно демонстрирует максимальные аккумулярующие свойства ртути, причем для Hg, Ni и Al коэффициенты аккумуляции для хищных видов примерно в 5 раз выше по сравнению с мирными (прежде всего за счет наибольших концентраций металлов в образцах ерша), тогда как для Cu и Zn значимых различий не выявлено.

Полученные результаты согласуются с заключением многочисленных исследований [Suedel et al., 1994; Немова и др., 2014; de Paiva Magalhães et al., 2015; Моисеенко и др., 2021], что, несмотря на многообразие механизмов поглощения, детоксикации и выведения элементов, концентрации металлов-микроэлементов, аккумулируемые рыбой, значительно выше тех, что присутствуют в водной среде.

Сравнение современных данных, полученных нами для р. Иртыш в 2022 г.,

с результатами других исследований представлено в таблице 5. Полученные нами данные выявили существенно меньшие современные концентрации изученных металлов для большинства видов рыб кроме ерша, в мышцах которого концентрации находятся на близком уровне с данными других исследований. Сопоставимый уровень концентраций ртути был обнаружен также в леще [Моисеенко, Гашкина, 2016]. Ранее на большом объеме данных, полученных в процессе проведения ИВЭП СО РАН многолетнего (1994–2012 гг.) комплексного мониторинга экологического состояния водоемов бассейна р. Оби, было показано, что уровень содержания ТМ в мышечной ткани рыб, в среднем не превышает принятые в России нормы [Попов, Андросова, 2014]. Для стерляди, обитающей в нижнем течении р. Иртыш, содержание Hg, Cd и Pb также не превышают допустимых уровней [Чемагин и др., 2019].

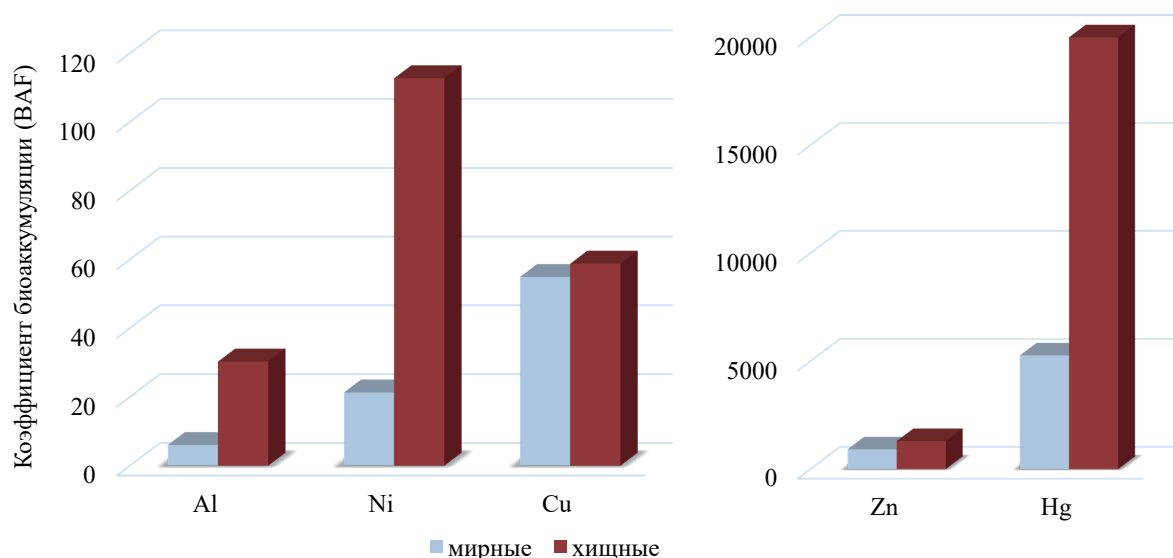


Рис. 3. Сравнение коэффициентов биоаккумуляции металлов для мирных и хищных видов рыб р. Иртыш

Fig. 3. Comparison of bioaccumulation coefficients for peaceful and predatory fish species of the Irtysh River

Таблица 5

Сравнение концентраций металлов в различных видах рыб бассейна рек Обь и Томь, полученных в исследованиях разных лет

Table 5

Comparison of metal concentrations in various fish species of the Ob and Tom River basin obtained in studies of different years

Вид рыбы	Тип питания	Концентрация , мкг/г								
		Cu		Ni		Zn		Hg		
		Наши данные	[Попов, Андросова, 2014]	Наши данные	[Лопарева и др., 2016]	Наши данные	[Попов, Андросова, 2014]	Наши данные	[Попов, Андросова, 2014]	[Моисеенко, Гапкина, 2016]
Лещ	мирные	0.10	1.3	0.05	0.48–0.55	2.2	30	0.043	0.05	0.031
Пелядь		0.10	0.75	0.05		2.6	24	0.007	0.55	-
Елец		0.50	1.2	0.10		7.0	52	0.008	0.06	-
Уклейка		0.11	-	0.16		6.0	-	0.011	-	-
Ерш	хищные	0.28	0.33	0.65	0.50–0.65	8.3	9.3	0.075	0.12	-
Щука		0.10	1.2	0.04		1.2	23	0.023	0.05	0.31

Таким образом, в настоящее время риска потребления рыбы, обитающей в р. Иртыш на изучаемом участке, не выявлено, однако выявление физико-химических факторов, влияющих на биодоступность ТМ, оценка их накопления в биоте, а также возможной биомагнификации по трофической цепи, связь с полом, возрастом и конкретными видами рыб, представляет сложную задачу, которая требует дальнейших исследований, большого статистического материала и использования моделирования [Lavoie et al., 2013; Дину, Моисеенко, 2015; de Paiva Magalhães et al., 2015; Моисеенко и др., 2021].

Заключение

Современные уровни содержания ТМ в мышцах исследуемых рыб р. Иртыш находятся в пределах нормы и не превышают установленных уровней безопасности пищевых продуктов, нормируемых СанПиН. Содержания кадмия и свинца – минимальны (ниже предела обнаружения метода). Полученные концентрации ТМ в мышечной ткани рыб ниже данных других исследований аналогичных видов рыб водоемов бассейна р. Оби, только для ерша концентрации находятся на близком уровне. Рассчитанные для различных видов рыб коэффициенты биоаккумуляции показали, что наименьшая степень

аккумуляции ТМ наблюдается для алюминия, максимальная – для ртути, представляя следующий ряд накопления: $Al < Cu = Ni < Zn < Hg$. Увеличение коэффициентов аккумуляции от мирных к хищным видам выявлены для ртути, никеля и алюминия (~ в 5 раз), тогда как для меди и цинка значимых различий не обнаружено. В настоящее время риск потребления рыбы, обитающей в р. Иртыш на изучаемом участке, не выявлено. Однако для оценки прогноза бионакопления ТМ в рыбах при изменении параметров окружающей среды, влияющих на биодоступность металлов, необходимо изучение всего комплекса химико-аналитических данных и гидробионтов водных экосистем и использование соответствующих математических моделей.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interests

Работа выполнена в рамках реализации проекта «Научные исследования по изучению динамики содержания химических веществ и изменчивости состояния водных экосистем в бассейне трансграничной реки Иртыш (Ертис) с целью разработки научно-обоснованных рекомендаций по оценке качества воды и состояния водных объектов по гидрохимическим показателям для трансграничных участков рек бассейна реки Иртыш (Ертис)» шифр 22-14-НИР/02.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории гидробиологии ИВЭП СО РАН за организацию и проведение экспедиционных работ, и предоставленный материал.

Список литературы

Агбалян Е.В., Шинкарук Е.В., Попова Т.Л., Максименко Ю.И. Эссенциальные и токсичные элементы в биосубстратах жителей полуострова Ямал // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2019. № 3. С. 35–45.

Аналитический отчёт о результатах оценки динамики и основных тенденций изменения содержания химических веществ и изменчивости состояния водных объектов бассейна р. Иртыш с целью выявления характерных видов их загрязнения (регистрационный номер результата НИР – 68509761-22-14-НИР/02-1) по теме: «Научные исследования по изучению динамики содержания химических веществ и изменчивости состояния водных экосистем в бассейне трансграничной реки Иртыш (Ертис) с целью разработки научно-обоснованных рекомендаций по оценке качества воды и состояния водных объектов по гидрохимическим показателям для трансграничных участков рек бассейна реки Иртыш (Ертис)» шифр 22-14-НИР/02 (промежуточный, этап 1). Книга 1. ООО «Центр инженерных технологий». Барнаул, 2022.

ГОСТ 17.1.2.04-77 «Охрана природы. Гидросфера. Правила таксации рыбохозяйственных водных объектов» Гидросфера: Сб. ГОСТов. М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. 62 с.

ГОСТ Р 56219-2014. Вода. Определение содержания 62 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой: дата введения 01.01.2016. М: Стандартиформ, 2015. 36 с.

Дину М.И., Моисеенко Т.И. ACIDFORMMET патент № 2015617036 – 2015.

Комов В.Т., Степанова И.К., Гремячих В.А. Содержание ртути в мышцах рыб из водоёмов Северо-Запада России: причины интенсивного накопления и оценка негативного эффекта на состояние здоровья людей // Актуальные проблемы водной токсикологии. Борок: Институт биологии внутренних вод РАН, 2004. С. 99–123.

Лопарева Т.Я., Шарипова О.А., Петрушенко Л.В. Уровень накопления токсикантов в мышечной ткани рыб в водных бассейнах Республики Казахстан // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2016. № 2. С. 115–122.

Моисеенко Т.И. Влияние геохимических факторов водной среды на биоаккумуляцию металлов в организме рыб // Геохимия. 2015. № 3. С. 222–233. doi: 10.1134/S001670291503009X

Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. Биоаккумуляция ртути в рыбах как индикатор уровня загрязнения вод // Геохимия. 2016. № 6. С. 495–504. doi: 10.1134/S0016702916060045

Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А., Дину М.И. Распределение форм металлов и оценка их биодоступности в водах суши Арктического региона (предложения к нормативам качества вод) // Геохимия. 2021. Т. 66, № 7. С. 630–645. doi: 10.1134/S0016702921070053

МУК 4.1.1483-03. Определение химических элементов в биологических средах и препаратах методами атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой: Методические указания. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. 56 с.

Немова Н.Н., Лысенко Л.А., Мещерякова О.В., Комов В.Т. Ртуть в рыбах: биохимическая индикация // Биосфера. 2014. Т. 6. №. 2. С. 176–186.

Науменко Е.Н., Ушакова А.Ю., Голубкова Т.А. Питание сеголеток рыб Куршского залива Балтийского моря в 2016 году // Труды ВНИРО. 2020. Т. 179. С. 60–77. doi: 10.36038/2307-3497-2020-179-60-77

Попов П.А., Андросова Н.В. Содержание тяжелых металлов в мышечной ткани рыб из водоемов бассейна реки Оби // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2014. № 4(28). С. 108–122.

Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. N 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» и Приложение к приказу Министерства сельского хозяйства РФ от 13 декабря 2016 г. N 552 (с изменениями и дополнениями).

Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 30 октября 2020 г. N 646 «Об утверждении правил рыболовства для Западно-Сибирского рыбохозяйственного

бассейна» (с изменениями и дополнениями) (ред. от 21.02.2022) III. Промышленное рыболовство (за исключением добычи (вылова) водных беспозвоночных), прибрежное рыболовство в Обь-Иртышском рыбохозяйственном районе.

Приложение №1 к правилам рыболовства для Западно-Сибирского рыбохозяйственного бассейна. Перечень зимовальных ям, расположенных на водных объектах рыбохозяйственного значения Западно-Сибирского рыбохозяйственного бассейна (с изменениями и дополнениями от 21 февраля 2022 г.).

СанПиН 2.3.2.1078–01 от 14 ноября 2001 г. № 36 «Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов». 2021. 74 с.

Скальный А.В., Рудаков И.А., Нотова С.В., Скальный В.В., Бурцева Т.И., Баранова О.В., Губайдулина С.Г. Биоэлементология: основные понятия и термины: терминологический словарь. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. 50 с.

Чемагин А.А., Волосников Г.И., Кыров Д.Н., Либерман Е.Л. Тяжелые металлы Hg, Cd, Pb в организме стерляди (*Acipenser ruthenus* L.), Нижний Иртыш // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2019. Т. 22, № 2. С. 225–233.

Чугунова Е.О., Бурдина Н.Ф. Мониторинг содержания тяжелых металлов в рыбе и нерыбных объектах промысла // Пермский аграрный вестник. 2019. № 4 (28). С. 140–145.

Шульгин Ю.Я., Лаженцева Л.Ю., Шульгина Л.В. Гигиеническая оценка потребления и качества рыбных продуктов // Гигиена и санитария. 2007. № 2. С. 41–44.

Arnot J.A., Gobas F.A. A review of bioconcentration factor (BCF) and bioaccumulation factor (BAF) assessments for organic chemicals in aquatic organisms // Environmental Reviews. 2006. Vol. 14. P. 257–297. doi: 10.1139/a06-005

Azaman F., Juahir H., Yunus K., Azid A., Kamarudin M.K.A. et al. Heavy metal in fish: Analysis and human health-a review // Jurnal Teknologi. 2015. Vol. 77, no. 1. С. 61–69.

Cera A., Marandola C., Scalici M. Southernmost record of *Gymnocephalus cernua* (Linnaeus, 1758) in European lakes // BioInvasions Records. 2021. Vol. 10, no. 3. P. 683–690. doi: 10.3391/bir.2021.10.3.18

Closset M., Cailliau K., Slaby S., Marin M. Effects of Aluminium Contamination on the Nervous System of Freshwater Aquatic Vertebrates: A Review // International journal of molecular sciences. 2021. Vol. 23, no. 1. P. 31. doi: 10.3390/ijms23010031

de Paiva Magalhães D., da Costa Marques M.R., Baptista D.F., Buss D.F. Metal bioavailability and toxicity in freshwaters // Environmental Chemistry Letters. 2015. Vol. 13, no. 1. P. 69–87. doi: 10.1007/s10311-015-0491-9

Depew D.C., Burgess N.M., Anderson M.R., Baker R., Bhavsar S.P. et al. An overview of mercury concentrations in freshwater fish species: a national fish mercury dataset for Canada // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2013. Vol. 70, no. 3. P. 436–451. doi: 10.1139/cjfas-2012-0338

Gutsch M., Hoffman J.A review of Ruffe (*Gymnocephalus cernua*) life history in its native versus non-native range // Reviews in Fish Biology and Fisheries. 2016. Vol. 26. С. 213–233.

doi: 10.1007/s11160-016-9422-5

Lavoie R.A., Jardine T.D., Chumchal M.M., Kidd K.A., Campbell L.M. Biomagnification of mercury in aquatic food webs: a worldwide meta-analysis // *Environmental science & technology*. 2013. Vol. 47, no. 23. P. 13385–13394. doi: 10.1021/es403103t

Łuczyńska J., Paszczyk B., Łuczyński M.J. Fish as a bioindicator of heavy metals pollution in aquatic ecosystem of Pluszne Lake, Poland, and risk assessment for consumer's health // *Ecotoxicology and environmental safety*. 2018. Vol. 153. P. 60–67. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.01.057

Renieri E.A., Alegakis A.K., Kiriakakis M., Vinceti M., Ozcagli E. et al. Cd, Pb and Hg biomonitoring in fish of the Mediterranean region and risk estimations on fish consumption // *Toxics*. 2014. Vol. 2. P. 417–442. doi: 10.3390/toxics2030417

Suedel B.C., Boraczek J.A., Peddicord R.K., Clifford P. A., Dillon T.M. Trophic transfer and biomagnification potential of contaminants in aquatic ecosystems // *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology / Eds G.W. Ware. Springer, New York. 1994. Vol. 136. P. 21–89. doi: 10.1007/978-1-4612-2656-7_2

Sun T., Wu H., Wang X., Ji C., Shan X., Li F. Evaluation on the biomagnification or biodegradation of trace metals in global marine food webs by meta-analysis // *Environ. Pollut.* 2020. Vol. 264. P.113–856. doi: 10.1016/j.envpol.2019.113856

US EPA Method 1631, Revision E: Mercury in water by oxidation, purge and trap, and cold vapor atomic fluorescence spectrometry. 2002. In U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Office of Science and Technology, Engineering and Analysis Division (4303). Washington, D.C. 46 p.

References

Agbalyan E.V., Shinkaruk E.V., Popova T.L., Maksimenko Yu.I. Essential and toxic elements in the biosubstrates of the inhabitants of the Yamal Peninsula // *Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug*. 2019. No. 3. P. 35–45. (in Russian).

Analytical report on the results of assessing the dynamics and main trends in changes in the content of chemicals and the variability of the state of water bodies in the basin of the river. Irtysh in order to identify the characteristic types of their pollution (registration number of the result of research - 68509761-22-14-NIR / 02-1) on the topic: “Scientific research on the study of the dynamics of the content of chemicals and the variability of the state of aquatic ecosystems in the basin of the transboundary river Irtysh (Ertis) in order to develop scientifically based recommendations for assessing the quality of water and the state of water bodies by hydrochemical indicators for transboundary sections of the rivers of the Irtysh (Ertis) river basin” code 22-14-NIR / 02 (intermediate, stage 1). Book 1. Center for Engineering Technologies LLC. Barnaul, 2022. (in Russian).

GOST 17.1.2.04-77 “Nature protection. Hydrosphere. Taxation Rules for Fishery Water

Bodies". 2000. 62 p. (in Russian).

GOST R 56219- 2014. Water. Determination of 62 elements by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) method: data vvedeniya 01.01.2016. Moscow: Standartinform, 2015. 36 p. (in Russian).

Dinu M.I., Moiseenko T.I. ACIDFORMMET Patent №. 2015617036 - 2015.

Komov V.T., Stepanova I.K., Gremyachikh V.A. Mercury content in muscles of fish from North-West Russia: causes of intensive accumulation and assessment of the negative effect on human health // Current problems of aquatic toxicology. Borok: Institute of Inland Water Biology RAS. 2004. P. 99–123. (in Russian).

Lopareva T.Ya., Sharipova O.A., Petrushenko L.V. Level of accumulation of toxicants in fish muscle tissue in water basins in the Republic of Kazakhstan // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries. 2016. No. 2. P. 115–122. (in Russian).

Moiseenko T.I. Impact of geochemical factors of aquatic environment on the metals bioaccumulation in fish // Geochemistry International. 2015. Vol. 53. P. 213–223. doi: 10.1134/S001670291503009X. (in Russian).

Moiseenko T.I., Gashkina N.A. Bioaccumulation of mercury in fish as indicator of water pollution // Geochemistry International. 2016. Vol. 54. P. 485–493. doi: 10.1134/S0016702916060045. (in Russian).

Moiseenko T.I., Gashkina N.A., Dinu M.I. Distribution of Metal Species and the Assessment Their Bioavailability in the Surface Waters of the Arctic: Proposals for the Water Quality Standards // Geochemistry International. 2021. Vol. 59. P. 683–698. doi: 10.1134/S0016702921070053. (in Russian).

MUK 4.1.1483-03. Determination of chemical elements in biological media and preparations using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry: Guidelines. M.: Federal Center for State Sanitary and Epidemiological Surveillance of the Ministry of Health of Russia, 2003. 56 p. (in Russian).

Nemova N.N., Lysenko L.A., Meshcheryakova O.V., Komov V.T. Mercury in fish: biochemical indication // Biosphere. 2014. Vol. 6, no. 2. P. 176–186. (in Russian).

Naumenko E.N., Ushakova A.Yu., Golubkova T.A. Feeding of the young-of-the-year fishes of the Curonian Lagoon of the Baltic Sea in 2016 // Proceedings of VNIRO. 2020. Vol. 179. P. 60–77. doi: 10.36038/2307-3497-2020-179-60-77. (in Russian).

Popov P.A., Androsova N.V. Metal content in the muscular tissue of fish from the Ob River // Bulletin of the Tomsk State University. Biology. 2014. No. 4 (28). P. 108–122. (in Russian).

Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation of December 13, 2016 N 552 "On approval of water quality standards for water bodies of fishery significance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery significance" and Appendix to the order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated December 13, 2016 N 552 (as amended). (in Russian).

Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation of October 30, 2020 N

646 “On approval of fishing rules for the West Siberian fishery basin” (with amendments and additions) (as amended on February 21, 2022) III. Industrial fishing (except for the extraction (catch) of aquatic invertebrates), coastal fishing in the Ob-Irtysh fishery region. (in Russian).

Appendix N 1 to the rules of fishing for the West Siberian fishery basin. List of wintering pits located on water bodies of fishery significance in the West Siberian fishery basin (as amended and supplemented on February 21, 2022). (in Russian).

SanPiN 2.3.2.1078-01 dated November 14, 2021 №. 36 “Hygienic requirements for the safety and nutritional value of food products”. 2021. (in Russian).

Skalny A.V., Rudakov I.A., Notova S.V., Skalny V.V., Burtseva T.I., Baranova O.V., Gubaidulina S.G. Bioelementology: basic concepts and terms: terminological dictionary. Orenburg: State Educational Institution OSU, 2005. 50 p. (in Russian).

Chemagin A.A., Volosnikov G.I., Kyrov D.N., Liberman E.L. Heavy metals Hg, Cd, Pb in the body of sterlet (*Acipenser ruthenus* L.), the Lower Irtysh River // Bulletin of the Murmansk State Technical University. 2019. Vol. 22, no. 2. P. 225–233. (in Russian).

Chugunova E.O., Burdina N. F. Heavy metal content monitoring in Fish and non-Fish fishing objects // Perm Agrarian Bulletin. 2019. No. 4 (28). P. 140–145. (in Russian).

Shulgin Yu.P., Lazhentseva L.Yu., Shulgina L.V. Hygienic assessment of the intake of fish products and their quality // Hygiene and Sanitation. 2007. No. 2. P. 41–44. (in Russian).

Arnot J.A., Gobas F.A. A review of bioconcentration factor (BCF) and bioaccumulation factor (BAF) assessments for organic chemicals in aquatic organisms // Environmental Reviews. 2006. Vol. 14. P. 257–297. doi: 10.1139/a06-005

Azaman F., Juahir H., Yunus K., Azid A., Kamarudin M.K.A. et al. Heavy metal in fish: Analysis and human health-a review // Jurnal Teknologi. 2015. Vol. 77, no. 1. C. 61–69.

Cera A., Marandola C., Scalici M. Southernmost record of *Gymnocephalus cernua* (Linnaeus, 1758) in European lakes // BioInvasions Records. 2021. Vol. 10, no. 3. P. 683–690. doi: 10.3391/bir.2021.10.3.18

Closset M., Cailliau K., Slaby S., Marin M. Effects of Aluminium Contamination on the Nervous System of Freshwater Aquatic Vertebrates: A Review // International journal of molecular sciences. 2021. Vol. 23, no. 1. P. 31. doi: 10.3390/ijms23010031

de Paiva Magalhães D., da Costa Marques M.R., Baptista D.F., Buss D.F. Metal bioavailability and toxicity in freshwaters // Environmental Chemistry Letters. 2015. Vol. 13, no. 1. P. 69–87. doi: 10.1007/s10311-015-0491-9

Depew D.C., Burgess N.M., Anderson M.R., Baker R., Bhavsar S.P. et al. An overview of mercury concentrations in freshwater fish species: a national fish mercury dataset for Canada // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2013. Vol. 70, no. 3. P. 436–451. doi: 10.1139/cjfas-2012-0338

Gutsch M., Hoffman J.A review of Ruffe (*Gymnocephalus cernua*) life history in its native versus non-native range // Reviews in Fish Biology and Fisheries. 2016. Vol. 26. C. 213–233. doi: 10.1007/s11160-016-9422-5

Lavoie R.A., Jardine T.D., Chumchal M.M., Kidd K.A., Campbell L.M. Biomagnification of mercury in aquatic food webs: a worldwide meta-analysis // *Environmental science & technology*. 2013. Vol. 47, no. 23. P. 13385–13394. doi: 10.1021/es403103t

Łuczyńska J., Paszczyk B., Łuczyński M.J. Fish as a bioindicator of heavy metals pollution in aquatic ecosystem of Pluszne Lake, Poland, and risk assessment for consumer's health // *Ecotoxicology and environmental safety*. 2018. Vol. 153. P. 60–67. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.01.057

Renieri E.A., Alegakis A.K., Kiriakakis M., Vinceti M., Ozcagli E. et al. Cd, Pb and Hg biomonitoring in fish of the Mediterranean region and risk estimations on fish consumption // *Toxics*. 2014. Vol. 2. P. 417–442. doi: 10.3390/toxics2030417

Suedel B.C., Boraczek J.A., Peddicord R.K., Clifford P. A., Dillon T.M. Trophic transfer and biomagnification potential of contaminants in aquatic ecosystems // *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology / Eds G.W. Ware. Springer, New York. 1994. Vol. 136. P. 21–89. doi: 10.1007/978-1-4612-2656-7_2

Sun T., Wu H., Wang X., Ji C., Shan X., Li F. Evaluation on the biomagnification or bio-dilution of trace metals in global marine food webs by meta-analysis // *Environ. Pollut.* 2020. Vol. 264. P.113–856. doi: 10.1016/j.envpol.2019.113856

US EPA Method 1631, Revision E: Mercury in water by oxidation, purge and trap, and cold vapor atomic fluorescence spectrometry. 2002. In U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Office of Science and Technology, Engineering and Analysis Division (4303). Washington, D.C. 46 p.

CONTENT OF HEAVY METALS IN THE MUSCLE TISSUE OF PREDATORY AND NON-PREDATORY FISHES OF THE IRTYSH RIVER

S.S. Eyrikh, L.V. Kolotushkina, T.G. Serykh

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul,

E-mail: steyrikh@gmail.com, lilichkashol661@gmail.com, tangers62@gmail.com

Fish is a widely used object of environmental study, primarily because of their human consumption. At the same time, fish is an integral indicator of the state of both freshwater and marine aquatic ecosystems, since they accumulate pollution over a relatively long period of time and reflect the bioavailability of heavy metals (HM) and the features of their accumulation in specific aquatic ecosystems. Determination of modern levels of HM concentrations in the muscles of the predatory and non-predatory fish species of the Irtysh river showed that the concentrations of Pb, Cd and Hg didn't exceed the threshold levels for fish and products from it established in Russian Federation, so at present there is no risk of fish consumption for people. The obtained results are consistent with retrospective and modern data of the ecological state of water compartments in the Ob river basin, although in general are characterized by lower concentrations of heavy metals. Among the studied fish species, the ruffe has the highest con-

centrations of HMs. Bioaccumulation factors (BAF) calculated for various fish species showed that Hg revealed highest accumulating properties, especially in predatory and benthivorous species, Zn demonstrated potential for bioaccumulation in some species, while bioaccumulation didn't observe for Al, Cu and Ni. BAF in predatory species was approximately 5 times higher compared to non-predatory ones for Hg, Ni and Al.

Key words: heavy metals; fish; predatory and non-predatory species; bioaccumulation; BAF; Irtysh River.

Received August 29, 2023. Accepted: April 1, 2024

Сведения об авторах

Эйрих Стелла Сергеевна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0001-9346-2068. E-mail: steyrikh@gmail.com.

Колотушкина Лилия Вячеславовна – аспирант, младший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 0000-0003-2594-0659. E-mail: lilichkashol661@gmail.com.

Серых Татьяна Гертиевна – ведущий инженер Института водных и экологических проблем СО РАН. Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1. ORCID: 000000000000-0003-3392-9126. E-mail: tangers62@gmail.com.

Information about authors

Eyrikh Stella Sergeevna – PhD in Chemistry, senior researcher of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0001-9346-2068. E-mail: steyrikh@gmail.com.

Kolotushkina Liliya Vyacheslavovna – first-year postgraduate student, junior researcher of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 0000-0003-2594-0659. E-mail: lilichkashol661@gmail.com.

Serikh Tatyana Gertievna – chief engineer of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS (IWEP SB RAS). 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russia. ORCID: 000000000000-0003-3392-9126. E-mail: tangers62@gmail.com.