



УДК 597.5:549.25 (571.511)

Среда обитания водных биологических ресурсов

Содержание тяжёлых металлов в сиговых рыбах водоёмов Таймырского полуострова

Т. О. Барабашин¹, Ю. В. Косенко², И. В. Кораблина², Л. Г. Горгола²

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО»), Окружной проезд, 19, Москва, 105187

² Южный филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («Южный»), ул. Береговая, 21в, Ростов-на-Дону, 344002

E-mail: barabashin@vniro.ru

SPIN-код: Т.О. Барабашин – 9638–5175; Ю.В. Косенко – 4638–7175; И.В. Кораблина – 5040–4170; Л.Г. Горгола – 7816–5379

Цель работы: определить современные уровни и закономерности накопления наиболее токсичных тяжёлых металлов в сиговых видах рыб рек и озёр Таймырского полуострова, как индикатора антропогенных загрязнений региона.

Материалом исследования являлись результаты обследования 8 сиговых видов рыб из 10 водных объектов Норило-Пясинской озёрно-речной системы. Всего было проанализировано 148 проб рыб различных видов на содержание кадмия, свинца, никеля и ртути, а также 75 проб на содержание меди.

Новизна: впервые даны оценки и определены возможные закономерности содержания кадмия, свинца, никеля, меди и ртути в мышцах широкого спектра сиговых видов рыб в водных объектах Таймырского полуострова.

Используемые методы: определение тяжёлых металлов в мышцах рыб выполнялось методами атомной абсорбции с электротермической атомизацией и беспламенной атомной абсорбции. Статистическую обработку данных осуществляли в среде MS Excel и прикладном пакете Statistica 14.0.

Результаты: концентрации изучаемых тяжёлых металлов в мышцах сиговых видов рыб в своём большинстве не превышали безопасных пороговых значений как по Техническому регламенту Таможенного Союза, так и по регламенту Европейской комиссии. Распределение кадмия и ртути по видам рыб, водоёмам и экологическим группам имело статистически значимые различия, а по другим металлам – носило случайный характер. При этом следует отметить, что влияние Норильского промышленного района на концентрации тяжёлых металлов в мышцах рыб, очевидно, не прослеживалось и могло быть обусловлено естественными причинами.

Практическая значимость: полученные результаты использованы для установления соответствия безопасности основных ценных промысловых видов рыб региона принятым в России требованиям технического регламента Таможенного союза.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, свинец, кадмий, ртуть, сиговые, водоёмы п-ва Таймыр.

Heavy metal content in whitefish in a number of rivers and lakes of the Taimyr Peninsula

Timofej O. Barabashin¹, Julia V. Kosenko², Irina V. Korablina², Liliya G. Gorgola²

¹ Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography («VNIRO»), 19, Okruzhnoy proezd, Moscow, 105187, Russia

² Southern Branch of branch of VNIRO («Southern»), 21 v, Beregovaya st., Rostov-on-Don, 344002, Russia

The objective of this study was to determine current levels and patterns of accumulation of the most toxic heavy metals in whitefish species in rivers and lakes of the Taimyr Peninsula, as an indicator of anthropogenic pollution in the region.

The study was based on the results of a survey of eight whitefish species from 10 water bodies in the Norilo-Pyasinskaya lake-river system. A total of 148 fish samples of various species were analyzed for cadmium, lead, nickel, and mercury, as well as 75 samples for copper.

Novelty: For the first time, estimates have been provided and possible patterns of cadmium, lead, nickel, copper, and mercury concentrations in the muscles of a wide range of whitefish species in water bodies of the Taimyr Peninsula have been determined.

Methods used: Heavy metals in fish muscles were determined using atomic absorption with electrothermal atomization and flameless atomic absorption. Statistical data processing was performed in MS Excel and the Statistica 14.0 application package.

Results: The concentrations of the studied heavy metals in the muscles of whitefish species generally did not exceed the safe thresholds set by both the Technical Regulations of the Customs Union and the European Commission regulations. The distribution of cadmium and mercury by fish species, water bodies, and ecological groups showed statistically significant differences, while for other metals, it was random. It should be noted that the influence of the Norilsk industrial region on heavy metal concentrations in fish muscles was apparently not observed and could have been due to natural causes.

Practical significance: The obtained results were used to establish the compliance of the main valuable commercial fish species in the region with the requirements of the Technical Regulations of the Customs Union adopted in Russia.

Keywords: heavy metals, lead, cadmium, mercury, whitefish, water bodies of the Taimyr peninsula.

ВВЕДЕНИЕ

Содержание тяжёлых металлов всегда являлось и является важным аспектом изучения самых различных водных экосистем. Аккумуляция этой группы элементов в рыбах, особенно тех, которые активно используются в промысле и употребляются в пищу, представляет собой серьёзную экологическую и токсикологическую проблему современности в разных регионах мира [Saidon et al., 2024]. Такие элементы, как кадмий, свинец, ртуть обладают высокой токсичностью даже в следовых количествах, способны накапливаться в тканях организмов и передаваться по пищевым цепям, представляя угрозу как для водных экосистем, так и для здоровья человека. Рыбы, занимая ключевые позиции в водных трофических сетях, служат важными биоиндикаторами загрязнения окружающей среды, а также потенциальным источником поступления токсичных элементов в организм человека через потребляемую продукцию.

Исследованный район Таймырского полуострова, в частности участок Норило-Пясинской озёрно-речной системы, находится под непосредственным и интенсивным влиянием Норильского промышленного района, который относится к одним из самых экологически неблагополучных в стране, и где были выявлены очень высокие концентрации тяжёлых металлов, в первую очередь — меди и никеля, в целом ряде компонентов экосистем, в том числе и в водной среде [Zhulidov et al., 2011]. В условиях антропогенного воздействия Норильского металлургического комбината на водные экосистемы, мониторинг содержания тяжёлых металлов в рыбе приобретает особую актуальность. Согласно ряду исследований [Znad et al., 2022], металлы в промышленных сточных водах обладают высокой токсичностью и медленно разлагаются, что представляет угрозу здоровью человека и других живых организмов, поэтому они считаются одними из самых опасных элементов. Изучение их концентраций в различных видах рыб позволяет не только оценить степень загрязнения водоёмов, но и выявить виды-аккумуляторы, представляющие наибольший риск для потребителей. Кроме того, подобные исследования необходимы для разработки научно обоснованных рекомендаций по безопасному потреблению рыбной продукции и оценки её

безопасности в качестве промыслового ресурса, а также для характеристики продуктивной части популяций, как ресурса для естественного и искусственного воспроизводства рыбных запасов.

Целью данного исследования было определить современные уровни и закономерности накопления наиболее токсичных тяжёлых металлов в сиговых видах рыб рек и озёр Таймырского полуострова, как индикатора антропогенных загрязнений региона. Впервые даны оценки и определены возможные закономерности содержания кадмия, свинца, никеля, меди и ртути в мышцах широкого спектра сиговых видов рыб в водных объектах Таймырского полуострова, полученные на значительном материале в рамках исследований ихтиофауны подсемейства Сиговых (Coregoninae). Кроме того, именно Сиговые в Красноярском крае являются наиболее ценной и эксплуатируемой группой водных биоресурсов [Перепелин и др., 2012] и активно вылавливаются при промысле. В этом случае контроль концентраций токсикантов в мышцах данной группы рыб является особо важной задачей в рамках продовольственной безопасности.

Отдельное внимание мы уделили статистической оценке межвидовых различий, различий бионакопления в разных экологических группах, а также распределения по разным водоёмам. Полученные данные вносят вклад в понимание биоаккумуляционных процессов тяжёлых металлов в арктической зоне и могут быть использованы для оценки экологических рисков и обеспечения пищевой безопасности, а также для характеристики потенциальных производителей ценных и особо ценных видов рыб Таймыра.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Отлов рыбы для исследований проводился типовыми орудиями лова (невода, ставные, плавные и кольцевые сети, спиннинг) в водных объектах полуострова Таймыр — в частности: реках Амбарная, Норильская, озере Пясино, реке Пясино и устьевых участках основных притоков реки Пясино — р. Дудыпта, Агапа, Янгода, Таря, Пура и Озёрная в 2023–25 гг. (рис. 1).

Для оценки уровня накопления тяжёлых металлов были обследованы 8 видов сиговых рыб из 10 водных объектов Таймырского полуострова (табл. 1). Всего



Рис. 1. Места отбора проб рыбы на содержание тяжёлых металлов в водоёмах полуострова Таймыр (2023–2025 гг.)
Fig. 1. Fish sampling sites for heavy metal content in water bodies of the Taimyr Peninsula (2023–2025)

Таблица 1. Количество проанализированных проб различных видов рыб из водных объектов полуострова Таймыр (2023–2025 гг.)

Table 1. Number of analyzed samples of various fish species from water bodies of the Taimyr Peninsula (2023–2025)

Вид	р. Норильская	р. Амбарная	оз. Пясина	р. Пясина	р. Дудыпта	р. Агана	р. Тарей	р. Янгода	р. Пура	р. Озерная	Всего
Нельма <i>Stenodus leucichthys</i> (Güldenstädt, 1772)	0	0	1	5	0	0	0	0	0	1	7
Ряпушка <i>Coregonus sardinella</i> , Valenciennes, 1848	1	0	1	4	0	0	0	0	0	0	6
Тугун <i>C. tugun</i> (Pallas, 1814)	3	4	13	2	0	0	0	1	0	0	23
Пелядь <i>C. peled</i> (Gmelin, 1789)	0	0	1	4	0	0	0	0	0	0	5
Муксун <i>C. clupeaformis</i> (Mitchill, 1818)	0	0	2	12	0	1	0	0	0	0	15
Чир <i>C. nasus</i> (Pallas, 1776)	0	0	7	12	0	0	0	0	1	1	21
Сиг-пыжьян <i>C. pidschian</i> (Gmelin, 1789)	0	1	36	24	1	2	2	1	2	1	70
Валёк (<i>Prosopium cylindraceum</i> (Pennant, 1784))	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Итого	4	5	62	63	1	3	2	2	3	3	148

было проанализировано 148 проб рыб различных видов на содержание кадмия, свинца, никеля и ртути, а также из них 75 проб на содержание меди.

Отбор проб рыб проводился из уловов в соответствии с ГОСТ 31339-2006¹, хранение — в соответствии с используемыми методиками анализа (ФР.ФР.1.31.2019.32870², ФР.1.31.2015.21649³). Исследования проб водных биологических ресурсов на содержание тяжелых металлов были выполнены сотрудниками аккредитованного аналитического испытательного центра Азово-Черноморского филиала ФГБНУ «ВНИРО» (номер записи в реестре аккредитованных лиц № RA.RU.510217) методиками, соответствующими для мониторинга загрязнения водных объектов [Барабашин и др., 2018].

Определение **общей ртути** в водных биологических ресурсах проводилось в соответствии с методикой «Массовая доля ртути в пробах гидробионтов. Методика измерений методом беспламенной атомной абсорбции». Выполнение измерений массовой доли ртути основано на восстановлении ионов ртути до элементного состояния оловом двуххлористым, переводением её в газовую фазу продуванием анализируемой аликвоты пробы воздухом и измерении концентрации ртути в газовой фазе по величине поглощения ее паров при длине волны 253,7 нм. Анализ проводился с использованием ртутного анализатора типа РА-915М с приставкой РП-92 (НПО «ЛЮМЭКС», Россия).

Определение **кадмия, меди, никеля и свинца** в пробах водных биологических ресурсов проводилось в соответствии с Методикой измерений массовых долей железа, марганца, мышьяка, никеля и хрома в пробах гидробионтов методом атомной абсорбции с электротермической атомизацией. Методы основаны на измерении величины абсорбции атомного пара определяемого элемента в абсорбционной графитовой трубке. Аликвота (10–20 мкл) подкисленного водного раствора, полученного после кислотной минерализации проб гидробионтов, дозировалась в полость трубки. Затем абсорбционная трубка нагревалась электротоком по программе, включающей три стадии: выпаривание пробы до сухого остатка, озонирование и импульсный нагрев до температуры атоми-

зации. В момент атомизации проводилось измерение величины абсорбции атомного пара определяемого элемента. Измеряемая абсорбционность атомного пара металла связана с концентрацией ионов этого металла в анализируемой пробе градуировочной зависимостью. Анализ проб гидробионтов на содержание кадмия, меди, никеля и свинца проводился на атомно-абсорбционных спектрофотометрах АА-860 («NIPPON JARRELL ASH», Япония) и МГА-915МД (НПО «ЛЮМЭКС», Россия).

Статистическая обработка данных проводилась с помощью программы Statistica 14.0. Проверка на нормальность выполнялась с использованием теста Шапиро-Уилка. Влияние видовой и экологической специфичности, локализации места отбора определялось с применением критерия Краскела-Уоллиса. Взаимосвязи оценивались с помощью ранговой корреляции Спирмена.

Исследования проводились в рамках реализации Мирового соглашения между Енисейским территориальным управлением Росрыболовства, ГНЦ ФГБНУ «ВНИРО» и АО «НТЭК».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основные значения концентраций исследуемых тяжелых металлов в различных видах рыб приводятся в табл. 2. Следует отметить, что концентрации **никеля** в пробах мышечной ткани в основном были ниже значений пределов обнаружения, которые есть в используемой методике определения. Было отмечено лишь 12 образцов, где были получены значимые результаты — в основном для сига, а также единично для чира, муксуна и нельмы. Согласно Регламенту Commission Regulation (EC) 2023/915 от 25 апреля 2023 г. «О максимально допустимых уровнях некоторых загрязняющих веществ в пищевых продуктах» (далее — европейский регламент (ЕР))⁴, и Техническому регламенту Таможенного Союза ТР ТС 021/2011 (далее — ДУ)⁵ для никеля не разработаны допустимые пороги концентраций в рыбе. Для **кадмия** количество значимых концентраций составило 62 пробы (в основном в сиге и тугуне), но превышения допустимого ДУ не отмечено. Максимальные уровни ЕР для этого металла были незначительно превышены в 8 пробах таких видов, как тугун, сиг и нельма. **Свинец** отмечен в 65 пробах, но нигде концентрации не превышали ДУ. Самые высокие концентрации этого металла,

¹ https://rosgosts.ru/file/gost/67/120/gost_31339-2006.pdf

² Методика измерений массовых долей железа, марганца, мышьяка, никеля и хрома в пробах гидробионтов методом атомной абсорбции с электротермической атомизацией. 2018. Ростов-на-Дону: Виразж. 16 с.

³ Методика выполнения измерений массовой доли ртути в пробах гидробионтов методом беспламенной атомной абсорбции. 2014. Ростов-на-Дону: Виразж. 14 с.

⁴ <https://fsvps.gov.ru/files/reglament-komissii-es-2023-915-ot-25-aprelja-2023-goda-o-maksimalnyh-urovnjah-nekotoryh-zagraznjajushhih-veshhestv-v-pishhevyyh-produktah-otmenjajushhih-reglament-es-1881-2006/>

⁵ <https://docs.cntd.ru/document/902320560>

близкие к порогу ДУ, отмечены в тугуне на оз. Пясино (0,81 мг/кг) и чире на р. Пясины (0,91 мг/кг). Максимальные уровни ЕР по содержанию свинца были превышены в 11 пробах рыб, главным образом – сига, чира, тугуна и нельмы. Причем превышение не превышало 3-кратных значений от пороговых уровней.

Таблица 2. Диапазон концентраций тяжёлых металлов в тканях основных видов рыб из водных объектов Норило-Пясинской озёрно-речной системы (2023–2025 гг.)
Table 2. Range of heavy metal concentrations in tissues of the main fish species from water bodies of the Norilo-Pyasinsky lake-river system (2023–2025)

Вид		Кадмий, мг/кг	Свинец, мг/кг	Никель, мг/кг	Ртуть, мг/кг	Медь, мг/кг
Нельма	Мин.	н/п	н/п	н/п	0,01	0,20
	Макс.	0,07	0,52	5,08	0,10	1,00
	Сред.	0,01	0,09	0,73	0,04	0,55
	Мед.	н/п	н/п	н/п	0,03	0,57
Ряпушка	Мин.	н/п	н/п	н/п	0,01	0,47
	Макс.	0,04	0,46	н/п	0,02	0,60
	Сред.	0,01	0,16	н/п	0,01	0,54
	Мед.	0,01	0,13	н/п	0,01	0,54
Тугун	Мин.	н/п	н/п	н/п	н/п	0,45
	Макс.	0,15	0,81	1,18	0,07	4,20
	Сред.	0,03	0,08	0,05	0,01	1,15
	Мед.	0,02	н/п	н/п	0,01	0,76
Песядь	Мин.	н/п	н/п	н/п	0,01	0,30
	Макс.	0,01	0,11	н/п	0,05	0,30
	Сред.	н/п	0,05	н/п	0,02	0,30
	Мед.	н/п	0,06	н/п	0,01	0,30
Муксун	Мин.	н/п	н/п	н/п	н/п	0,18
	Макс.	0,01	0,27	1,05	0,04	3,60
	Сред.	н/п	0,04	0,17	0,02	1,03
	Мед.	н/п	н/п	н/п	0,02	0,49
Чир	Мин.	н/п	н/п	н/п	н/п	0,12
	Макс.	0,04	0,91	5,44	0,09	4,30
	Сред.	н/п	0,07	0,32	0,02	0,84
	Мед.	н/п	н/п	н/п	0,02	0,34
Сиг-пыжьян	Мин.	н/п	н/п	н/п	0,00	0,13
	Макс.	0,10	0,72	19,10	0,15	10,00
	Сред.	0,01	0,09	0,40	0,02	1,08
	Мед.	н/п	н/п	н/п	0,02	0,48
Валек	-	н/п	н/п	н/п	0,02	-
Допустимые уровни, мг/кг, не более*		0,2	1	-	0,6 хищная 0,3 не хищная	-
Допустимые уровни, мг/кг, не более**		0,05	0,3	-	0,5	-

Примечание: н/п – значение ниже пределов методики обнаружения: кадмий – 0,005 мг/кг, свинец – 0,05 мг/кг, никель – 0,50 мг/кг, ртуть – 0,005 мг/кг, медь – 0,01 мг/кг; * - согласно Техническому регламенту Таможенного Союза ТР ТС 021/2011⁶; ** - согласно Регламенту Commission Regulation(ЕС) 2023/915 от 25 апреля 2023 г. «О максимально допустимых уровнях некоторых загрязняющих веществ в пищевых продуктах»⁷.

⁶ <https://docs.cntd.ru/document/902320560>
⁷ <https://fsvps.gov.ru/files/reglament-komissii-es-2023-915-ot-25-aprelja-2023-goda-o-maksimalnyh-urovnjah-nekotoryh-zagraznjajushhih-veshhestv-v-pishhevyyh-produktah-otmenjajushhij-reglament-es-1881-2006/>

Ртуть выявлена в 145 пробах, но также нигде не отмечено превышений ДУ и максимальных уровней ЕР как для хищных, так и для не хищных видов рыб. Самые высокие значения были отмечены в сига на оз. Пясино (0,15 мг/кг). Значимые концентрации **меди** были выявлены во всех пробах тканей рыб и наиболее высокие значения, более 10 мг/кг, отмечены для сига из оз. Пясино. Максимальные уровни ЕР и ДУ для этого металла в рыбах не разработаны.

Статистический анализ данных показал, что проверка данных по всем концентрациям тяжёлых металлов по тесту Шапиро-Уилка определила, что значения статистически значимо отклоняются от нормального распределения.

Анализ распределения концентраций тяжёлых металлов показал, что есть статистически значимые различия по тесту Краскела-Уоллиса в распределении кадмия и ртути по разным видам рыб (рис. 2).

Несмотря на то, что значимые концентрации **никеля** в мышцах обследованных видов рыб были отмечены в незначительном числе образцов, сравнивая результаты по сигу с литературными данными [Amundsen et al., 2011], можно отметить, что полученные нами средние значения (0,40 мг/кг) были ниже, чем средние концентрации для озёр Кольского полуострова, где отмечались значения в 0,6–1 мг/кг. Максимальные значения (19,10 мг/кг), напротив – были значительно выше литературных данных, в которых этот показатель достигал лишь 2,3 мг/кг. По данным

исследователей из Сибирского отделения РАН [Ядренкина и др., 2023], содержание никеля в ряпушке, сига и щуке бассейна р. Пясины было 0,3, 0,49 и 0,51 мг/кг соответственно, что сходно с полученными нами результатами.

Самые высокие медианные значения **кадмия** отмечены в мышцах тугуна (0,02 мг/кг). Для сига максимальные значения концентраций в мышцах (0,1 мг/кг) были значительно выше таковых из озёр приграничных районов между Россией, Финляндией и Норвегией (0,04 мг/кг), тогда как средние значения были сходны – 0,01 и 0,025 мг/кг, соответственно [Amundsen et al., 2011].

Статистический анализ выявил высокую межвидовую гетерогенность накопления кадмия ($p < 0,001$). Основной вклад в различия накоплений вносит тугун, показатели которого статистически значимо отличаются от большинства других исследованных видов: сига, чира, муксуна ($p < 0,01$), а также нельмы и пеляди ($p < 0,05$). Остальные виды сиговых рыб образуют достаточно однородную группу без достоверных различий между собой. В целом же, характеризуя накопление кадмия в видах сиговых изученных водоёмов, можно отметить следующее. Наиболее выраженная аккумуляция кадмия характерна для тугуна и ряпушки. При этом тугун статистически значимо превосходит по этому показателю сига, нельму, чира, пелядь, муксуна и вальку ($p < 0,05$). Вальк, муксун, пелядь, чир и нельма образуют довольно однородную группу

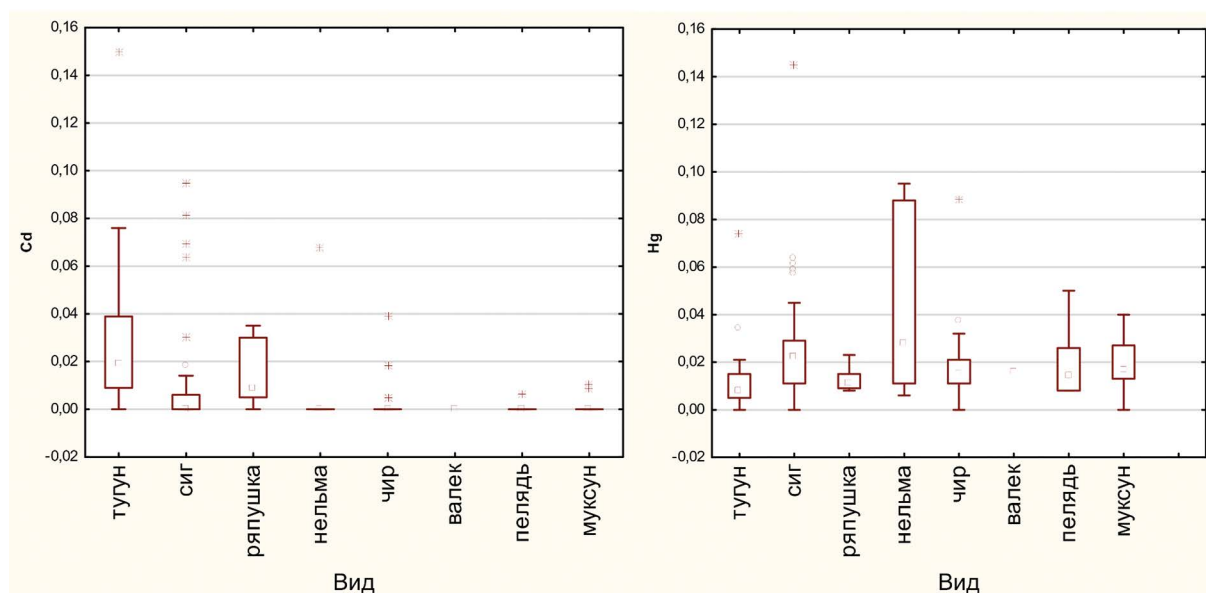


Рис. 2. Распределение концентраций кадмия и ртути в тканях рыб разных видов в водных объектах Норило-Пясинской озёрно-речной системы, мг/кг (2023–2025 гг.)

Fig. 2. Distribution of cadmium and mercury concentrations in the tissues of fish of different species in water bodies of the Norilo-Pyasinskaya lake-river system, mg/kg (2023–2025)

с низким уровнем содержания кадмия. Между ними нет статистически значимых различий. Распределение по накоплению кадмия разными видами в целом уменьшается в ряду: тугун>ряпушка>сиг>нельма, чир, пелядь, муксун, валёк.

Такие отличия тугуна в накоплении кадмия от других видов сиговых могут быть обусловлены его коротким циклом развития, который составляет в среднем всего 3–4 года [Атлас ..., 2003], и более интенсивным уровнем обмена веществ, т.к. у видов рыб более мелких размеров и веса этот показатель может быть заметно выше, чем у более крупных [Jerde et al., 2019].

Медианные значения концентрации **ртути** были достаточно высоки у сига, нельмы и чира (0,15, 0,10 и 0,09 мг/кг, соответственно). Средние и медианные значения концентраций ртути в мышцах рыб Норило-Пясинской озёрно-речной системы по нашим исследованиям заметно меньше тех, что отмечались для сига на водоёмах, расположенных в северо-западной части Мурманской области в приграничном районе между Россией, Финляндией и Норвегией, где эти величины находились от 0,02 до 1,0 мг/кг, в зависимости от озера [Терентьев, Кашулин, 2010; Kashulin et al., 2011]. В рыбах бассейна р. Пясина концентрации ртути были от 0,008 мг/кг в ряпушке и сие до 0,04 мг/кг в щуке [Ядренкина и др., 2023], что ниже отмеченных нами концентраций для сига и ряпушки.

Статистический анализ указывает на наличие значимых различий между видами по накоплению ртути ($p < 0,008$), но эти различия выражены гораздо слабее, чем в случае с кадмием. Тугун также значительно отличается по накоплению от нельмы и сига ($z = 2,90$ и $3,97$,

соответственно), но не в сторону увеличения, а, напротив, — в сторону уменьшения накопления ртути. Анализ значения средних рангов показал, что накопление ртути в разных видах кардинально отличается от таковой у кадмия и уменьшается в ряду: нельма>сиг>муксун, пелядь, валёк, чир>ряпушка>тугун.

Сравнивая концентрации **меди** в нельме и ряпушке с данными из других водоёмов, следует отметить, что в водоёмах Норило-Пясинской озёрно-речной системы эти показатели были значительно ниже, чем в бассейне р. Лена [Степанов, 2015], где концентрация этого металла находилась в пределах 9,0–12,0 мг/кг для нельмы и 1,19–1,5 для ряпушки. В рыбах р. Обь среднее содержание меди в мышцах рыб составило 0,94 мг/кг [Глазунова, 2005], что также несколько выше отмеченных нами значений. В мышцах 2-х форм сига озерах приграничных районов между Россией, Финляндией и Норвегией [Amundsen et al., 2011] концентрации меди в мышцах находились в пределах от 0,5 до 1,2 мг/кг, что незначительно больше концентраций, полученных в нашем исследовании.

Концентрации **свинца** в мышцах сига в водоёмах Норило-Пясинской озёрно-речной системы была сходной с таковой с результатами исследований в озёрах приграничных районов между Россией, Финляндией и Норвегией, где концентрация свинца находилась в среднем в пределах 0,5–1,8 мг/кг [Amundsen et al., 2011].

Корреляционный анализ по Спирмену выявил слабую отрицательную связь между концентрациями кадмия и ртути в исследуемой ихтиофауне ($R_s = -0,27$, при $p < 0,05$). Данный факт статистически подтвержда-

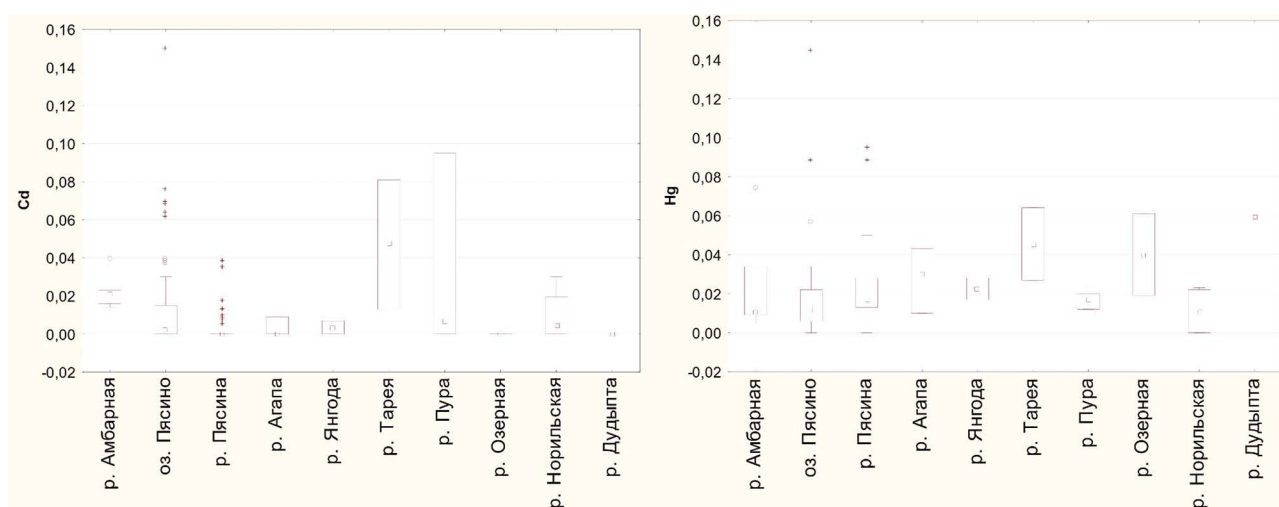


Рис. 3. Распределение концентраций кадмия и ртути в тканях рыб по разным водным объектам Норило-Пясинской озёрно-речной системы, мг/кг (2023–2025 гг.)

Fig. 3. Distribution of cadmium and mercury concentrations in fish tissues in different water bodies of the Norilo-Pyasinskaya lake-river system, mg/kg (2023–2025)

ет гипотезу о различных механизмах биоаккумуляции и путях поступления данных токсикантов в организмы рыб. Виды-гипераккумуляторы кадмия (например, тугун) не являются значимыми накопителями ртути, что указывает на специфичность трофических связей и путей миграции металлов в экосистеме.

Тест Краскела-Уоллиса выявил высокодостоверные различия в накоплении кадмия и ртути между исследуемыми водоёмами (рис. 3). Для свинца, никеля и меди таких различий не наблюдалось.

Самые высокие медианные значения по концентрации кадмия были отмечены для р. Тарей (0,047 мг/кг) и р. Амбарная (0,021 мг/кг), а ртути – в реках Тарей (0,045 мг/кг) и Дудыпта (0,04 мг/кг).

Пространственный анализ накопления **кадмия** выявил высокую неоднородность данных (критерий Краскела-Уоллиса $H=31,68$, $p=0,0002$), и отмечена зависимость его накопления в рыбах от водоёма вылова. Установлено, что наибольшие уровни накопления характерны для рек Тарей и Амбарная (средние ранги 133,3 и 129,4 соответственно), в то время как реки Озерная и Дудыпта характеризуются минимальным уровнем аккумуляции кадмия. Ранжирование водоёмов по уровню накопления кадмия в рыбах показало, что согласно распределению рангов, максимальные уровни отмечены в реках Тарей и Амбарная, затем идут река Пура, река Норильская и оз. Пясино, потом реки Пясино, Агапа и Янгота, а завершают ряд реки Озерная и Дудыпта.

Накопление **ртути** в рыбах различных водотоков также значимо отличалось ($H=31,68$, $p=0,02$), но эта зависимость была выражена значительно меньше, чем для кадмия. Наибольший уровень накопления отмечен для рек Дудыпта и Озерная, несколько ниже в р. Агапа и Янгота. Средние уровни накопления выявлены в реках Пясино, Амбарная и Пура, а самые низкие – в оз. Пясино, реки Норильская и Тарей.

В итоге можно отметить, что пространственное распределение кадмия и ртути в рыбах носит разнонаправленный характер. Водоёмы, характеризующиеся максимальным накоплением кадмия в рыбах (реки Тарей и Амбарная), являются относительно благополучными по содержанию ртути. И наоборот, локации с пиковыми концентрациями ртути (реки Дудыпта и Озерная) демонстрируют минимальные уровни аккумуляции кадмия. Это может указывать как на принципиально разные механизмы поступления и миграции данных токсикантов в исследуемых экосистемах, так и на зависимости, вызванные наличием или отсутствием значимых видов в выборке водоёмов (тугун и нельма). Также стоит отметить, что анализ распределения концентраций в рыбах по водоёмам указывает на то, что лидируют водотоки, удалённые от Норильского промышленного района (кроме высоких значений кадмия в рыбах р. Амбарная). Это указывает не только на влияние производств, но и на роль естественного фона в накоплении металлов в рыбах.

Таблица 4. Диапазон концентраций тяжёлых металлов в тканях экологических групп рыб из водных объектов Норило-Пясинской озерно-речной системы (2023–2025 гг.)

Table 4. Range of heavy metal concentrations in tissues of ecological groups of fish from water bodies of the Norilo-Pyasinskaya lake-river system (2023–2025)

Вид	Кадмий, мг/кг	Свинец, мг/кг	Никель, мг/кг	Ртуть, мг/кг	Медь, мг/кг	N
Бентофаги	Мин.	н/п	н/п	н/п	0,130	107
	Макс.	0,095	0,720	19,100	0,145	
	Сред.	0,005	0,073	0,285	0,022	
	Мед.	н/п	н/п	н/п	0,019	
Планктонофаги	Мин.	н/п	н/п	н/п	0,300	34
	Макс.	0,150	0,810	1,180	0,074	
	Сред.	0,022	0,089	0,035	0,013	
	Мед.	0,014	н/п	н/п	0,009	
Хищники	Мин.	н/п	н/п	н/п	0,200	7
	Макс.	0,068	0,520	5,080	0,095	
	Сред.	0,010	0,093	0,726	0,040	
	Мед.	н/п	н/п	н/п	0,028	

Примечание: н/п – значение ниже пределов методики обнаружения: кадмий – 0,005 мг/кг, свинец – 0,05 мг/кг, никель – 0,50 мг/кг, ртуть – 0,005 мг/кг, медь – 0,01 мг/кг

Важным аспектом распределения тяжёлых металлов в рыбах может являться тип питания и трофическая ниша вида. Так, среди рыб из водных объектов Норило-Пясинской озёрно-речной системы отмечены представители хищных (нельма), планктонофагов (ряпушка, тугун и пелядь) и бентофагов (муксун, чир, сиг, валёк) [Атлас ..., 2002]. Анализ концентраций тяжёлых металлов по основным экологическим группам приводится в табл. 4.

Также статистический анализ показал, что, согласно тесту Краскела-Уоллиса имеются различия в накоплении кадмия ($H = 35,29$; $p < 0,001$) и ртути ($H = 15,25$; $p < 0,001$), между исследуемыми экологическими группами. Для свинца, никеля и меди таких различий не наблюдалось (рис. 4).

При сравнении рангов было установлено, что экологическая специализация видов является детерминирующим фактором аккумуляции **кадмия**. Максимальное содержание токсиканта выявлено у планктонофагов (ранг 108,2), а минимальные – у хищников (ранг 59,4), что свидетельствует об отсутствии эффекта биомагнификации (бионакопления) данного металла в исследуемых трофических цепях.

Такая инверсия переноса кадмия в трофических цепях – явление в целом не уникальное. Хотя существуют чёткие свидетельства биоконцентрации кадмия, имеется мало доказательств, объясняющих её механизмы в водных экосистемах [Saidon et al., 2024]. Так, согласно литературным данным, было показано, что в заливе Сан-Франциско беспозвоночные имели более высокое трофическое обогащение кадмием, чем рыбы. Концентрация кадмия в рыбе (например, большеротом окуне (*Micropterus salmoides*))

была значительно ниже, чем в её возможной добыче – беспозвоночных (например, амфиподах, улитках и личинках насекомых) [Croteau et al., 2005]. Также отмечено, что, например, в таком морском хищнике, как меч-рыба (*Xiphias gladius*) выявлено почти на порядок меньше кадмия, чем в таком планктонофаге, как индийский анчоус (*Stolephorus indicus*) [Pragnya et al., 2021]. В прибрежных лагунах Калифорнийского залива отмечена достоверная отрицательная зависимость между накоплением кадмия и трофическим уровнем гидробионтов, включая рыб [Jara-Marini et al., 2003]. Считается, что основными путями поступления кадмия в организм рыб могут быть жабры и кожа, через которые он поступает с водой [Annabiet et al., 2013], что влияет на особенности бионакопления кадмия у рыб разных трофических уровней. Об этих же особенностях свидетельствуют и наши данные, которые показывают отсутствие бионакопления.

Статистический анализ выявил различия содержания ртути в тканях всех проанализированных экологических групп сиговых в обследованных водоёмах. Средние ранги чётко показывают увеличение концентраций в ряду: планктонофаги (50,15)-бентофаги (80,75)-хищники (97,29), что согласуется с их трофической специализацией и отражает эффект бионакопления в пищевой цепи. Такое накопление ртути по пищевой трофической цепи водоёмов в целом характерно для данного элемента [Saidon et al., 2024]. Следует отметить, что согласно исследованиям накопления ртути в 2-х разных формах сига в озёрах трансграничной зоны Кольского полуострова, в мышцах зоопланктоноядной многотычинковой формы концентрации ртути были в целом ниже, чем

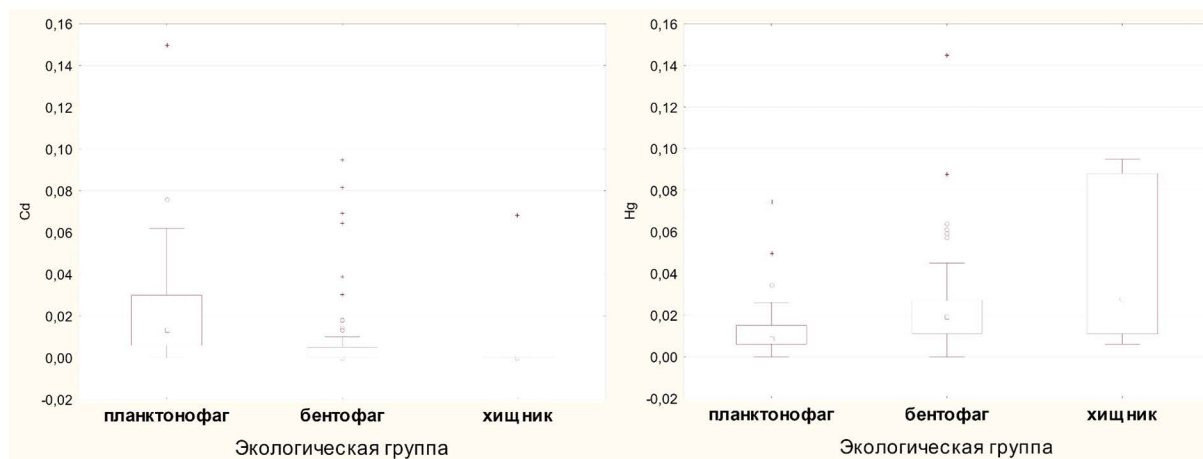


Рис. 4. Распределение концентраций кадмия и ртути в тканях различных экологических групп рыб из водных объектов Норило-Пясинской озёрно-речной системы, мг/кг (2023–2025 гг.).

Fig. 4. Distribution of cadmium and mercury concentrations in tissues of various ecological groups of fish from water bodies of the Norilo-Pyasinskaya lake-river system, mg/kg (2023–2025)

для бентоядной формы в этих же озёрах [Amundsen, et al., 2011].

На основании полученных данных по накоплению в различных видах разных экологических групп стоит отметить, что для мониторинга накоплений кадмия в водоёмах Таймыра целесообразно использовать в качестве индикационного объекта тугуна, а для мониторинга ртутных загрязнений — нельму.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во всех изученных пробах всех видов рыб превышений безопасных уровней (ДУ) кадмия, свинца и ртути отмечено не было. Превышение максимальных уровней ЕР для кадмия было незначительно в 8 пробах, для свинца — в 11 пробах, а для ртути превышения пороговых значений как для хищных, так и для нехищных видов, отмечено не было. Для меди и никеля пороговые значения не разработаны, но значимые концентрации меди были выявлены во всех пробах тканей рыб, тогда как для никеля — всего в 9. Это свидетельствует о незначительном числе случаев превышения безопасных порогов накопления и безопасности сиговых рыб как объектов промысла и пищевого сырья.

Статистический анализ по разным видам сиговых показал, что статистически значимые различия есть только в распределении кадмия (максимум — у тугуна) и ртути (максимум — у нельмы). Эти виды могут быть маркерными для мониторинга накопления данных элементов в мышцах рыб. Распределение концентраций тяжёлых металлов в рыбах по водоёмам, показало, что высокие медианные значения концентрации кадмия были отмечены в рыбах из рек Тарей и Амбарная, а ртути — из рек Дудыпта и Тарей. Это может указывать на воздействие природного фона рек Дудыпта и Тарей, где отсутствуют источники поступления антропогенных загрязнений, а также воздействия антропогенного влияния в р. Амбарная, которая протекает непосредственно по территории Норильского промышленного района.

Также статистический анализ показал, что, имеются различия в накоплении кадмия и ртути между экологическими группами рыб. Содержание кадмия в мышцах планктонофагов было достоверно выше, чем у бентофагов и хищников. Слабая отрицательная связь между концентрациями кадмия и ртути в исследуемой ихтиофауне подтверждает гипотезу о различных механизмах биоаккумуляции и путях поступления данных токсикантов в организмы рыб. В отличие от кадмия содержание ртути в мышцах статистически достоверно повышалось в ряду планктонофаги-бентофаги-хищники, что отражает эффект бионако-

пления в пищевой цепи и согласуется с литературными данными.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ВНИРО.

ЛИТЕРАТУРА

- Атлас пресноводных рыб России. 2003. Т. 1. / Ю. С. Решетников ред. М.: Наука. 379 с.
- Барабашин Т. О., Кораблина И. В., Павленко Л. Ф., Скрипник Г. В., Короткова Л. И. 2018. Методическое обеспечение мониторинга загрязнения водных объектов Азово-Черноморского бассейна // Водные биоресурсы и среда обитания. Т. 1. № 3–4. С. 9–27.
- Глазунова И. А. 2005. Содержание и особенности распределения тяжелых металлов в рыбах верховьев Оби. Автореф. дисс... канд. биол. наук. Барнаул: АлтГУ, 20 с.
- Перепелин Ю. В., Заделенов В. А., Гадинов А. Н. 2012. Современное состояние рыбохозяйственного комплекса Енисейского рыбохозяйственного района // Вопросы рыболовства. Т. 13. № 2 (50). С. 227–238.
- Степанов Г. П. 2019. Накопление тяжёлых металлов в мышцах сиговых рыб Булунского района // География и краеведение в Якутии. Мат. Вресп. науч.-практ. конф., посвящённой 105-летию со дня рождения А. И. Сивцевой. С. 189–193.
- Терентьев П. М., Кашулин Н. А. 2010. Изучение пространственно-временных особенностей накопления некоторых тяжёлых металлов в организмах сига водоёмов Северной Фенноскандии // Вестник Кольского научного центра РАН. № 1. С. 57–62.
- Ядренкина Е. Н., Шешуков С. А., Халилли Ф. П., Ядренкин А. В. 2024. Миграции тяжелых металлов по трофической цепи гидробионтов в бассейне р. Пясины на примере рыб // Биологические проблемы Севера. Межд. науч. конф. посвящ. 300-летию РАН. М.: «Знание-М». С. 301–302.
- Amundsen P.-A., Kashulin N. A., Terentjev P., Gjelland K. Ø., Koroleva I. M., Dauvalter V. A., Sandimirov S., Kashulin A., Knudsen R. 2011. Heavy metal contents in whitefish (*Coregonus lavaretus*) along a pollution gradient in a subarctic watercourse // Environ Monit Assess. V. 182: 301–316/ DOI 10.1007/s10661-011-1877-1.
- Annabi A., Said K., Messaoudi I. 2013. Cadmium: bioaccumulation, histopathology and detoxifying mechanisms in fish // American Journal of Research Communication. V. 1. P. 62–79.
- Croteau M.-N., Luoma S. N., Stewart A. R. 2005. Trophic transfer of metals along freshwater food webs: Evidence of cadmium

- biomagnification in nature // *Limnol. Oceanogr.*, V. 50(5). P. 1511–1519.
- Jara-Marini M.E., Soto-Jiménez M.F., Pérez-Osuna F. 2009. Trophic relationships and transference of cadmium, copper, lead and zinc in a subtropical coastal lagoon food web from SE Gulf of California // *Chemosphere*. V. 77. P. 1366–1373. DOI:10.1016/j.chemosphere.2009.09.025
- Jerde C.L., Kraskura K., Eliason E.J., Csik S.R., Stier A.C., Taper M.L. 2019. Strong Evidence for an Intraspecific Metabolic Scaling Coefficient Near 0.89 in Fish // *Front. Physiol.* V. 10. P. 1166.
- Kashulin N.A., Terentyev P.M., Amundsen P.A., Dauvalter V.A., Sandimirov S.S., Kashulin A.N. 2011. Specific Features of Accumulation of Cu, Ni, Zn, Cd, and Hg in Two Whitefish *Coregonus lavaretus* (L.) Morphs Inhabiting the Inari–Pasvik Lacustrine–Riverine System // *Inland Water Biology*. V. 4, № 3. P. 383–392.
- Pragnya M., Ajay B., Dinesh Kumar S., Byragi Reddy T. 2021. Bioaccumulation of heavy metals in different trophic levels of aquatic ecosystems with fish as a bioindicator in Visakhapatnam, India // *Marine Pollution Bulletin*. V. 165. P. 112162. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112162.
- Saidon N.B., Szabó R., Budai P., Lehel J. 2024. Trophic transfer and biomagnification potential of environmental contaminants (heavy metals) in aquatic ecosystems, *Environmental // Pollution*. V. 340, Pt 1. P. 122815. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.122815.
- Vinanthi Rajalakshmi, K.S., Liu, W.-C.; Balamuralikrishnan, B., Meyyazhagan, A., Sattanathan, G., Pappuswamy, M., Joseph, K.S., Paari, K.A., Lee, J.-W. 2023. Cadmium as an Endocrine Disruptor That Hinders the Reproductive and Developmental Pathways in Freshwater Fish: A Review // *Fishes*. V. 8. P. 589. DOI: 10.3390/fishes8120589.
- Zhulidov A.V., Gurtovaya T.Y., Roberts R.D., Pavlov D.F., Kämäri J., Meriläinen J.J., Pospelov I.N. 2011. Long-term changes of heavy metal and sulphur concentrations in ecosystems of the Taymyr peninsula (Russian Federation) north of the Norilsk industrial complex // *Environmental Monitoring and Assessment*. V. 181. № 1–4. P. 539–553.
- Znad, H., Awual, M., Martini, S. 2022. The utilization of algae and seaweed biomass for bioremediation of heavy metal-contaminated wastewater // *Molecules*. V. 27. P. 1275. DOI 10.3389/fphys.2019.01166
- REFERENCES**
- Atlas of Freshwater Fishes of Russia*. 2003. V. 1. / Yu.S. Reshetnikov, ed. Moscow: Nauka. 379 p. (In Russ.).
- Barabashin, T.O., Korablina, I.V., Pavlenko, L.F., Skrypnik, G.V., Korotkova, L.I. 2018. Methodological Support for Monitoring Pollution of Water Bodies of the Azov-Black Sea Basin // *Aquatic Bioresources and Habitat*. V. 1. № 3–4. P. 9–27. (In Russ.).
- Glazunova, I.A. 2005. Content and Distribution Features of Heavy Metals in Fish from the Upper Ob River. PhD Abstr. in biol. Barnaul: Altai State University. 20 p. (In Russ.).
- Perepelin, Yu. V., Zadelenov, V. A., Gadinov, A. N. 2012. Current State of the Fisheries Complex of the Yenisei Fishery District // *Fishery Issues*. V. 13. № 2 (50). P. 227–238. (In Russ.).
- Stepanov G.P. 2019. Accumulation of Heavy Metals in the Muscles of Whitefish in the Bulunsky District // *Geography and Local History in Yakutia*. Proc. of the V Repub. Scient. and Pract. Conf. Dedicated to the 105th Anniversary of the Birth of A.I. Sivtseva. P. 189–193. (In Russ.).
- Terentyev P.M., Kashulin N.A. 2010. Study of Spatio-Temporal Features of the Accumulation of Certain Heavy Metals in Whitefish Organisms in Water Bodies of Northern Fennoscandia // *Bull. of the Kola Science Center of the RAS*. V.1. p. 57–62. (In Russ.).
- Yadrenkina E.N., Sheshukov S.A., Khalilli F.P., Yadrenkin A.V. 2024. Migrations of heavy metals along the trophic chain of aquatic organisms in the Pyasina River basin using fish as an example // *Biological problems of the North*. Int. scientific conf. dedicated to the 300th anniversary of the RAS. Moscow: Znanie-M. P. 301–302. (In Russ.).
- Amundsen P.-A., Kashulin N.A., Terentjev P., Gjelland K. Ø., Koroleva I. M., Dauvalter V.A., Sandimirov S., Kashulin A., Knudsen R. 2011. Heavy metal contents in whitefish (*Coregonus lavaretus*) along a pollution gradient in a subarctic watercourse // *Environ Monit Assess*. V. 182: 301–316/ DOI 10.1007/s10661-011-1877-1.
- Annabi A., Said K., Messaoudi I. 2013. Cadmium: bioaccumulation, histopathology and detoxifying mechanisms in fish // *American Journal of Research Communication*. V. 1. P. 62–79.
- Croteau M.-N., Luoma S.N., Stewart A.R. 2005. Trophic transfer of metals along freshwater food webs: Evidence of cadmium biomagnification in nature // *Limnol. Oceanogr.*, V. 50(5). P. 1511–1519.
- Jara-Marini M.E., Soto-Jiménez M.F., Pérez-Osuna F. 2009. Trophic relationships and transference of cadmium, copper, lead and zinc in a subtropical coastal lagoon food web from SE Gulf of California // *Chemosphere*. V. 77. P. 1366–1373. DOI:10.1016/j.chemosphere.2009.09.025
- Jerde C.L., Kraskura K., Eliason E.J., Csik S.R., Stier A.C., Taper M.L. 2019. Strong Evidence for an Intraspecific Metabolic Scaling Coefficient Near 0.89 in Fish // *Front. Physiol.* V. 10. P. 1166.
- Kashulin N.A., Terentyev P.M., Amundsen P.A., Dauvalter V.A., Sandimirov S.S., Kashulin A.N. 2011. Specific Features of Accumulation of Cu, Ni, Zn, Cd, and Hg in Two Whitefish *Coregonus lavaretus* (L.) Morphs Inhabiting the Inari–Pasvik Lacustrine–Riverine System // *Inland Water Biology*. V. 4, № 3. P. 383–392.
- Pragnya M., Ajay B., Dinesh Kumar S., Byragi Reddy T. 2021. Bioaccumulation of heavy metals in different trophic levels of aquatic ecosystems with fish as a bioindicator in Visakhapatnam, India // *Marine Pollution Bulletin*. V. 165. P. 112162. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112162.
- Saidon N.B., Szabó R., Budai P., Lehel J. 2024. Trophic transfer and biomagnification potential of environmental contaminants (heavy metals) in aquatic ecosystems, *Environmental*

- // Pollution. V. 340, Pt 1. P. 122815. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.122815.
- Vinanthi Rajalakshmi, K.S., Liu, W.-C.; Balamuralikrishnan, B., Meyyazhagan, A., Sattanathan, G., Pappuswamy, M., Joseph, K.S., Paari, K.A., Lee, J.-W.* 2023. Cadmium as an Endocrine Disruptor That Hinders the Reproductive and Developmental Pathways in Freshwater Fish: A Review // Fishes. V. 8. P. 589. DOI: 10.3390/fishes8120589.
- Znad, H., Awual, M., Martini, S.* 2022. The utilization of algae and seaweed biomass for bioremediation of heavy metal-contaminated wastewater // Molecules. V. 27. P. 1275. DOI 10.3389/fphys.2019.01166
- Zhulidov A. V., Gurtovaya T. Y., Roberts R. D., Pavlov D. F., Kämäri J., Meriläinen J. J., Pospelov I. N.* 2011. Long-term changes of heavy metal and sulphur concentrations in ecosystems of the Taymyr peninsula (Russian Federation) north of the Norilsk industrial complex // Environmental Monitoring and Assessment. V. 181. № 1–4. P. 539–553.
- Поступила в редакцию 03.04.2026 г.
Принята после рецензий 29.04.2026 г.*