



Среда обитания водных биологических ресурсов

Содержание кадмия в промысловых рыбах Баренцева моря (по многолетним данным)

М.А. Новиков¹, Е.А. Горбачева¹, М.Н. Харламова²

¹Полярный филиал ВНИРО («ПИНРО») им. Н.М. Книповича, ул. Академика Книповича, 6, Мурманск, 183038, Россия

²Мурманский арктический университет (МАУ), ул. Коммуны, 9, Мурманск, 183038, Россия

E-mail: mnovik@pinro.ru

SPIN-коды: Новиков М.А. 2063–5426; Горбачева Е.А. 3135–1411; Харламова М.Н. 5482–4673

Цель работы: исследовать уровень содержания кадмия в мышцах и печени основных промысловых рыб Баренцева моря.

Материалом исследования послужили образцы рыбы, выловленной в ходе экспедиций «ПИНРО» им. Н.М. Книповича в Баренцевом море в период 2009–2021 гг. Изучены пробы мышц и печени трески, пикши, камбалы-ерша, чёрного палтуса, морской камбалы и пёстрой зубатки. Всего исследовано более 1500 проб.

Новизна: впервые на большом объёме материала выполнен сравнительный анализ содержания Cd в шести промысловых рыбах Баренцева моря, определены фоновые уровни его содержания, которые можно рассматривать в качестве допустимых.

Используемые методы: кадмий в пробах определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии на атомно-абсорбционном спектрофотометре фирмы «Shimadzu» (Япония). Статистическую обработку данных и построение диаграмм осуществляли в среде MS Excel и прикладном пакете Statistica 13.

Результаты: показано, что среднее содержание кадмия в мышцах и печени исследованных рыб не превышало установленного норматива допустимого содержания 0,2 и 0,7 мг/кг сырой массы соответственно. Каких-либо признаков антропогенного загрязнения исследованных рыб Cd не обнаружено. Содержание Cd в печени рыб в 11–17 раз превышает таковое в мышцах. Отмечено, что уровни содержания Cd в мышцах и печени рыб отличались высокой вариабельностью (дисперсией). Основная причина вариабельности – различия в рационе и характере питания рыбы. Содержанию Cd в мышцах присуща видоспецифичность. Печень способна активно выводить Cd из организма. Показано также, что на уровень содержания Cd могут оказывать влияние видовая принадлежность и региональные особенности (район обитания и вылова рыбы).

Практическая значимость: полученные результаты могут быть использованы для учёта вклада регионального фактора при принятии решений о соответствии уровня безопасности промысловых рыб, выловленных в Баренцевом море, принятым в России нормативным требованиям.

Ключевые слова: токсичные металлы, треска, пикша, палтус, камбала-ёрш, мышцы, печень.

Cadmium content in commercial fishes of the Barents Sea (based on long-term data)

Mikhail A. Novikov¹, Elena A. Gorbacheva¹, Marina N. Kharlamova²

¹ Polar branch of VNIRO (N.M. Knipovich «PINRO»), 6, Academician Knipovich St., Murmansk, 183038, Russia

² Murmansk Arctic University («MAU»), 9, Kommuny St., Murmansk, 183038, Russia

The aim: to study the amount of cadmium found in muscle tissue and liver of the main commercial fish species of the Barents Sea.

Research material was comprised of fish samples collected during the expeditions of N.M. Knipovich «PINRO» in the Barents Sea in 2009–2021. The study was based on muscle and liver samples taken from cod, haddock, long rough dab, Greenland halibut, plaice and spotted catfish. Over 1500 samples were analyzed.

Novelty: for the first time a comparative analysis of Cd concentration in six commercial fish species of the Barents Sea was run and background readings were provided using such a big amount of data.

Methods used: the content of Cd in fish samples was measured using Shimadzu (Japan) Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS). Statistical data processing and charting were done using MS Excel and application software package of Statistica 13.

The results show that the average content of Cd in muscle and liver of the examined fish did not exceed the established sanitary standard for the maximal concentrations of 0.2 and 0.7 mg/kg of wet weight, respectively. No evidence of anthropogenic contamination of the studied species by cadmium was found. The cadmium concentrations in liver was 11–17 times higher than in muscle. The total content of Cd in muscle and liver demonstrated a high variability (dispersion). The main reason for this variability is differences in the diet and feeding habits of the fishes. The cadmium content in muscle tissues is species-specific. The liver is capable of removing Cd from the body actively. The study also found other factors influencing the cadmium concentrations, such as taxonomic affiliation and regional peculiarities (particularly, habitats and fishing areas).

Practical significance: the acquired results were used to determine whether the commercial fishes meet the sanitary standards used in Russia.

Keywords: toxic metals, cod, haddock, Greenland halibut, long rough dab, muscles, liver.

ВВЕДЕНИЕ

Тяжёлые металлы (ТМ), такие как кадмий, ртуть и свинец, из-за своего значительного токсичного действия на организмы, в том числе и гидробионтов, принято считать трассерами техногенного воздействия на окружающую среду [Христофорова, 1989; Моисеенко, Гашкина, 2018].

Кадмий (Cd) относится к редким элементам и практически не встречается в земной коре в свободном состоянии. К основным антропогенным источникам поступления Cd в морские воды относятся горнорудные (горно-обогачительные) и металлургические предприятия, а также сточные воды. Для Cd важнейшим источником эмиссии является цветная металлургия, объём выбросов которой в 1,5 раза превышает природную эмиссию этого металла. Кадмий присутствует в воздухе крупных городов вследствие истирания шин, эрозии некоторых видов пластмассовых изделий, красок и клеящих материалов [Чибисова, Долгань, 1998; Моисеенко, Гашкина, 2018]. Большое количество Cd содержится в фосфатных удобрениях, в результате чего до трети объёма поступления Cd в окружающую среду происходит именно в результате их производства и применения [Моргунов, 2011; Le Croizier et al., 2018].

В природных водах Cd присутствует преимущественно в элементарной форме, имеют место также неорганические соединения с CO_3 и PO_4 . Во взвеси Cd преобладает в сорбированном комплексе, который часто десорбируется с поверхности взвеси при смешении речных и морских вод в зонах эстуариев [Моргунов, 2011].

Кадмий – один из самых токсичных элементов для гидробионтов, он относится к так называемым не эссенциальным элементам. Эти элементы способны накапливаться в организме животных и включаться в метаболические процессы, оказывая сильное токсическое воздействие [Моисеенко, 2015; Моисеенко, Гашкина, 2018; Liu et al., 2022]. При остром отравлении хлористым кадмием у рыб обнаруживают гиперплазию и распад респираторного эпителия жабр, эпидермиса кожи, некробиоз кишечника и проксимальных канальцев почек, гемопоэтической ткани. Хроническая интоксикация выражается замедлением роста, некробиотическими изменениями в жабрах, почках, печени, гемопоэтической ткани, отмечены образование доброкачественной опухоли в почках и деформация позвоночника [Метелев и др., 1971; Васильков и др., 1989; Thorphon et al., 2003]. Кроме того, в даже низких концентрациях CdCl_2 (0,0025 ppm) отмечено его негативное влияние на оплодотворение тропиче-

ских рыб *Prochilodus magdalenae* Steindachner, 1879: заметно снижалась фертильность самок, скорость и подвижность сперматозоидов [Sierra-Marquez et al., 2019].

Считают, что Cd характеризуется высокой способностью к биоаккумуляции. Исследования *in situ* показали положительную корреляцию между концентрациями Cd и металлотининов (MT), что свидетельствует о связи между MT и процессами биоаккумуляции Cd для некоторых видов рыб [Fernandes et al., 2007; Fernandes et al., 2008; Le Croizier et al., 2018]. Показано, что эта взаимосвязь в значительной степени видоспецифична [Siscar et al., 2014 a, b]. Накопление этого элемента в рыбе определяется не только его концентрацией в воде, но и в существенной мере зависит от таких факторов как pH и концентрация кальция (жёсткость воды) [Моисеенко, Гашкина, 2018].

Увеличение концентрации Cd в сторону более высоких трофических уровней у животных Арктики обнаружено лишь в некоторых случаях [Dehn et al., 2006]. Концентрации Cd в мышечной ткани китов, тюленей, рыбадных птиц и белых медведей не имеют тенденции к увеличению по сравнению с объектами их питания (рыба, морские беспозвоночные), и варьируют в весьма широком диапазоне значений: от ниже предела обнаружения (<0,015 мг/кг) до 0,668 мг/кг сырой массы (глупыш *Fulmarus glacialis* (L., 1761)) [Dietz et al., 1996]. Наибольшее среднее содержание Cd отмечено в мягких тканях моллюсков, головах и панцирях ракообразных, а также и печени белого медведя 0,477–7,79 мг/кг сырой массы.

Морская рыба – важная компонента водных биологических ресурсов, влияние токсических элементов на которую является проблемой, имеющей первостепенное значение с точки зрения качества и безопасности пищевой продукции. Содержание Cd в промысловой рыбе в странах Таможенного союза регулируется нормативом. Согласно ТР ТС 021/2011¹, в мышцах (филе, фарш) рыб содержание Cd не должно превышать 0,2 мг/кг (мкг/г) сырой массы, а в печени и продуктах из неё – 0,7 мг/кг.

Цель работы – исследовать и оценить уровень содержания кадмия в мышцах и печени промысловых рыб Баренцева моря.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материал для исследований собирался в рамках комплексных научных экспедиций, главным образом,

¹ Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС - 021 - 2011). М.: Росстандарт, 2011. 242 с. [https://Действующие_технические_регламенты_\(rst.gov.ru\)](https://Действующие_технические_регламенты_(rst.gov.ru)).

на судах Полярного филиала ГНЦ РФ ФГБНУ ВНИРО («ПИНРО» им. Н.М. Книповича) «Смоленск», «Вильнюс» и «Фриггоф Нансен» в рамках выполнения программ государственного мониторинга водных биологических ресурсов.

В настоящей работе представлены результаты анализа проб мышечной ткани шести промысловых рыб Баренцева моря – атлантической трески *Gadus morhua* L., 1758 ($n = 396$), пикши *Melanogrammus aeglefinus* (L., 1758) ($n = 263$), камбалы-ерша *Hippoglossoides platessoides* Gottsche, 1835 ($n = 213$), чёрного или синекорого палтуса *Reinhardtius hippoglossoides* (Walbaum, 1792) ($n = 165$), морской камбалы *Pleuronectes platessa* L., 1758 ($n = 98$) и зубатки пёстрой или пятнистой *Anarhichas minor* Ólafsson, 1772 ($n = 50$), пойманных в результате учётных тралений в период с 2009 по 2021 гг. включительно, практически на всей акватории Баренцева моря. Есть одно исключение: для чёрного палтуса пробы за 2009 г. отсутствуют (не пойман). Всего для отбора материала было выполнено более 530 траловых станций. Также исследовали содержание Cd в печени тех же рыб, но на несколько меньшем количестве экземпляров. Во всех случаях одну пробу мышц и печени отбирали у одного экземпляра рыбы.

Отбор проб рыб и их хранение осуществляли в соответствии с методическими указаниями ВНИРО [Изучение экосистем..., 2004]. По завершении отбора пробы были помещены в специальные пакеты и заморожены при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ для доставки в стационарную лабораторию.

Подготовка и химический анализ проб биоты выполнены в «ПИНРО» им. Н.М. Книповича. Подготовка проб проводили методом «мокрой» минерализации. Предварительно образцы тканей рыб тщательно измельчали и размешивали до пастообразного состояния. К навеске мышц или печени рыб добавляли смесь 70%-ной особо чистой HNO_3 и концентрированной H_2O_2 (4:1), выдерживали в течение 24 ч при комнатной температуре, затем помещали в микроволновую систему пробоподготовки МС-6 (НТФ «Вольта», г. Санкт-Петербург, Россия). Кадмий в пробах ихтиофауны определяли методом спектрофотометрии на атомно-абсорбционном спектрофотометре фирмы «Shimadzu», модель AA 6800 (Япония) в соответствии с ГОСТ 30178-96². Условия проведения измерений на приборе следующие: длина волны 228,8 нм, ширина щели 1,0/0,7 нм, система коррекции фона D2. Тип

пламени воздух/ацетилен. Для градуировки использовали Государственные стандартные образцы (ГСО) состава водных растворов ионов Cd (II). Каждая аналитическая серия включала «холодную» пробу, что позволяло контролировать возможное загрязнение образцов в процессе анализа. Согласно ГОСТ 30178-96 для использованного метода определения Cd допустимое относительное стандартное отклонение схожимости результатов измерений при $P = 0,95$ в зависимости от массовой доли элемента варьирует от 3 до 12%, относительное стандартное отклонение воспроизводимости результатов испытаний – от 9 до 40%. Нижний предел обнаружения применяемого метода анализа составлял 0,001 мг/кг сырой массы. Содержание Cd в промысловых рыбах указывали в мг/кг сырой массы. Статистическую обработку данных и построение диаграмм осуществляли в среде MS Excel и программе Statistica 13.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Данные по содержанию кадмия в мышцах исследованных рыб, представлены в табл. 1. Среднее содержание Cd в мышцах основных промысловых видов Баренцева моря было значительно ниже допустимого уровня 0,2 мг/кг сырой массы. Нулевые значения в табл. 1 указывают на то, что содержание Cd в рыбе было ниже предела обнаружения применяемого метода анализа.

Приведённые в табл. 1 уровни фонового содержания Cd в мышцах исследованных донных рыб Баренцева моря оказались в два раза ниже норматива. Величины фоновых уровней рассчитаны нами на основе подхода, предложенного ранее [Новиков и др., 2021; 2023]. Важно, что этот уровень оказался одинаковым для всех исследованных видов рыб, чего ранее нами не отмечалось. По всей видимости это не случайно. Вероятно, существует верхний, генетически обусловленный, предел содержания Cd в мышцах морских рыб. Превышение этого значения может приводить к гибели рыб, поэтому рыбы с более высоким содержанием Cd в мышцах встречаются одинаково редко.

Превышение фонового уровня содержания Cd может свидетельствовать в пользу антропогенного загрязнения рыбы. В нашем случае, количество таких проб не превышало 2% от всех исследованных экз. (1,78% у трески, 0,97% у камбалы-ерша, 0,62% у палтуса и т. д.). На таких малых объёмах данных нельзя уверенно отделить случаи антропогенного загрязнения от статистических отклонений, выбросов.

Характер распределения величин содержания Cd в мышцах всех исследованных рыб отличался от

² ГОСТ 30178-96. Сырьё и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов. М.: Стандартиформ, 2010. 32 с.

Таблица 1. Содержание кадмия в мышцах промысловых рыб Баренцева моря
 Table 1. Cadmium content in the muscle of commercial fish of the Barents Sea

Вид рыбы	Диапазон содержания, мг/кг	Среднее содержание $\pm m$ / медиана, мг/кг сырой массы	Стандартное отклонение	Фоновый уровень, 95 процентиль
<i>Gadus morhua</i>	0,0–0,26	$\frac{0,022 \pm 0,002}{0,009}$	0,038	0,10
<i>Melanogrammus aeglefinus</i>	0,0–0,21	$\frac{0,019 \pm 0,002}{0,01}$	0,029	0,10
<i>Hippoglossoides platessoides</i>	0,0–0,42	$\frac{0,021 \pm 0,003}{0,007}$	0,042	0,10
<i>Reinhardtius hippoglossoides</i>	0,0–0,20	$\frac{0,018 \pm 0,002}{0,007}$	0,031	0,10
<i>Pleuronectes platessa</i>	0,0–0,165	$\frac{0,025 \pm 0,003}{0,011}$	0,031	0,10
<i>Anarhichas minor</i>	0,001–0,179	$\frac{0,030 \pm 0,006}{0,012}$	0,041	0,10

Примечание: m – стандартная ошибка среднего арифметического.

нормального на основании критерия Колмогорова-Смирнова (во всех случаях $p < 0,01$).

В ходе статистической обработки представленных данных отмечены значимые различия в содержании Cd в мышцах исследованных рыб согласно однофакторному непараметрическому критерию Краскела-Уоллиса ($p = 0,000$). Диаграмма размаха по группам, выдаваемая статистикой, указывает на заметные отличия камбалы-ерша и морской камбалы от остальных рыб. В ходе попарных сравнений с помощью *U*-критерия Манна-Уитни выявлено, что содержание Cd в мышцах камбалы-ерша было достоверно отличалось от такового в пикше ($p = 0,01$), морской камбале ($p = 0,000$) и пёстрой зубатке ($p = 0,01$). В мышцах морской камбалы содержание Cd оказалось статистически значимо выше, чем в мышцах трески ($p = 0,002$), пикши ($p = 0,01$), палтуса ($p = 0,000$). Кроме того, содержание Cd в мышцах палтуса достоверно отличалось от такового у пикши ($p = 0,02$) и пёстрой зубатки ($p = 0,02$). В остальных парах различия в содержании Cd в мышцах оказались статистически не значимы. Таким образом, уровню содержания Cd в мышцах рыб присуща видоспецифичность, вероятно, сочетающаяся с проявлением других факторов.

Исследованные нами виды рыб на основе сведений о характере питания можно разделить на хищных – треска, чёрный палтус и бентофагов – пикша, морская камбала и пёстрая зубатка [Долгов, 2016]. Сравнение содержания Cd в мышцах исследованных хищных рыб и бентофагов на основе *U*-критерия Манна-Уитни выявило статистически значимые различия между группами ($p = 0,000$). Таким образом, со-

держание Cd в мышцах исследованных рыб, вероятно, зависит от их трофического статуса.

Анализ межгодовой динамики показателей содержания Cd в мышцах исследованных рыб не выявил достоверных трендов (рис. 1), за исключением некоторой тенденции снижения содержания Cd в палтуса.

Согласно нашим данным, зависимость содержания Cd от веса трески не наблюдается. Из рис. 2 видно, что содержание кадмия в мышцах практически не коррелирует с весом этой рыбы ($n = 137$, размер выборки связан с числом промеренных экз.). Анализируя представленные на рис. 2 данные, можно отметить, что наибольшая изменчивость и самые высокие значения содержания Cd в мышцах трески наблюдаются у рыб весом от 1,5 до 5,5 кг в возрасте 5–10 лет [Бойцов и др., 2003]. У более крупных рыб содержание Cd практически не зависит от веса, а значит и возраста. Та же закономерность отмечена и для пикши ($n = 118$, $R^2 = 0,0045$), с наибольшей вариабельностью содержания Cd у рыб весом от 0,7 до 2,5 кг.

Содержание Cd в печени исследованных промысловых рыб было в среднем в 13,4 раза выше, чем в мышцах (табл. 2).

Превышение содержания Cd в печени над таковым в мышцах находилось на уровне максимальных показателей, рассчитанных нами для других тяжёлых металлов. Более всего в печени исследованных рыб по сравнению с мышцами накапливается Cu – превышение в 18 раз [Новиков и др., 2021]. На следующем месте находится Cd. Максимальное содержание Cd в печени рыб Баренцева моря в ряде случаев превышало предельно допустимый уровень, установленный

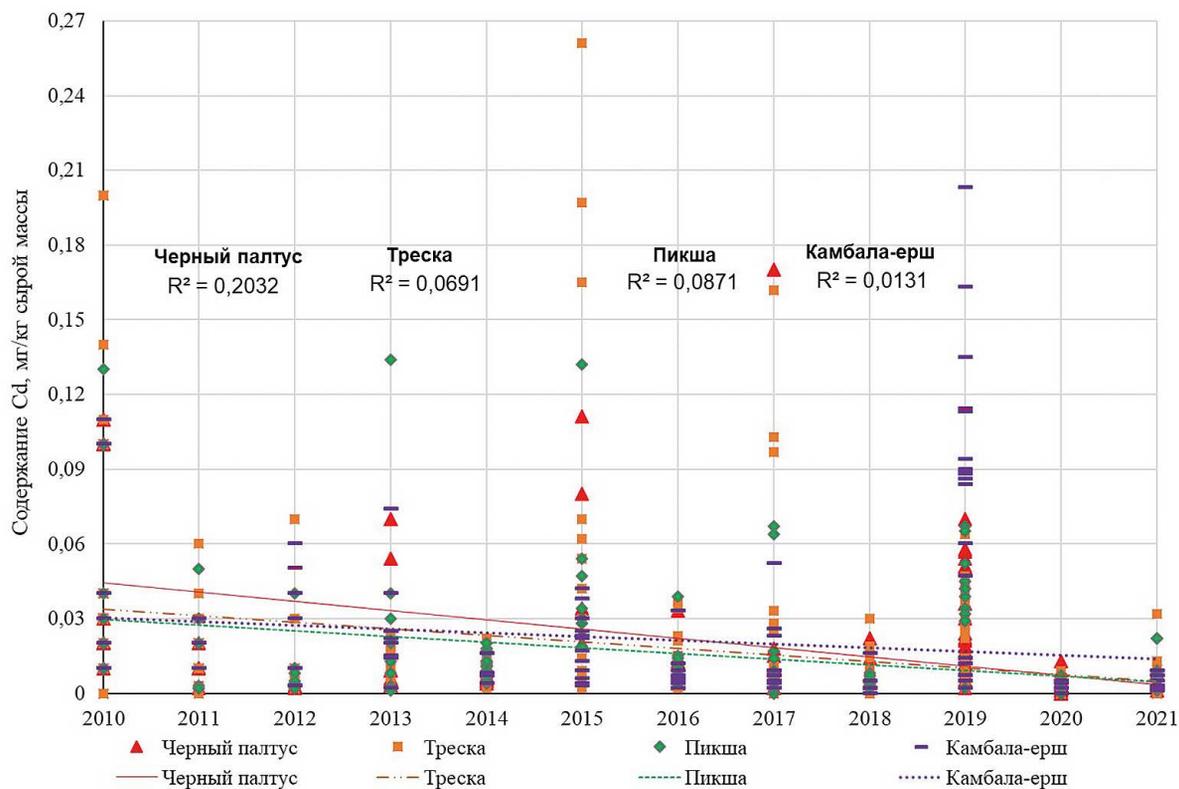


Рис. 1. Динамика содержания кадмия в мышцах промысловых рыб Баренцева моря в период 2010–2021 гг. с указанием линий трендов и коэффициентов регрессии

Fig. 1. Dynamics of cadmium content in the muscle of commercial fish of the Barents Sea in the period 2010–2021 with indication of trend lines and regression coefficients

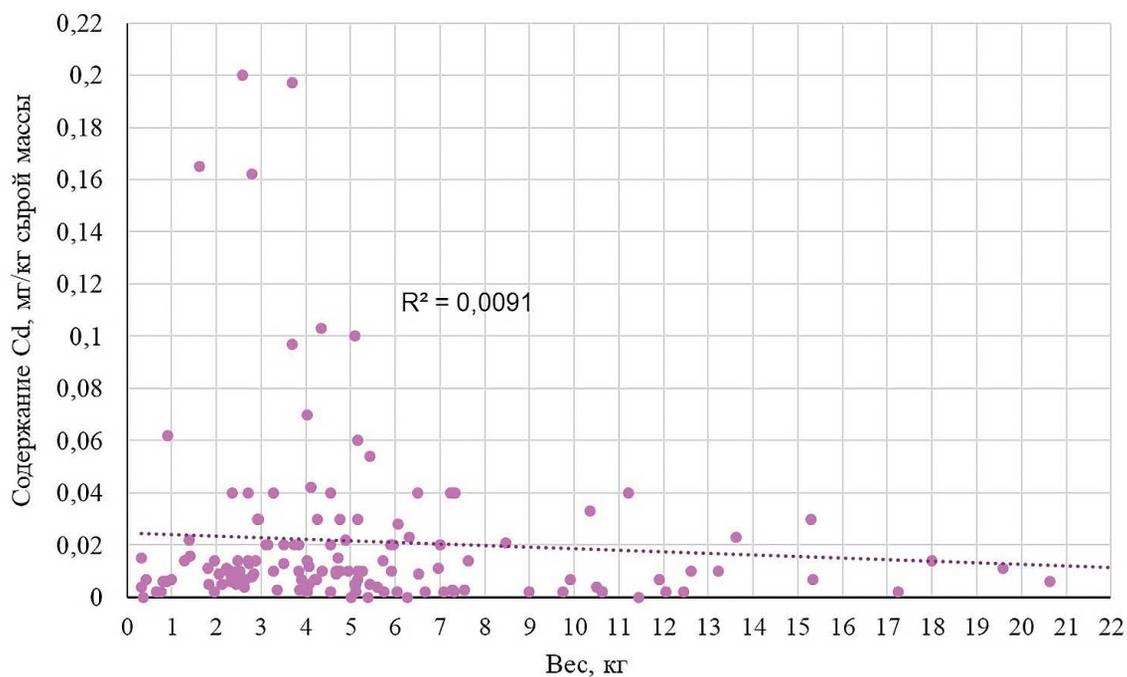


Рис. 2. Связь содержания кадмия в мышцах трески Баренцева моря с весом рыбы с указанием линии тренда и коэффициента регрессии

Fig. 2. The relationship of cadmium content in the muscle of the Barents Sea cod with the weight of the fish, indicating the trend line and regression coefficient

Таблица 2. Содержание кадмия в печени промысловых рыб Баренцева моря
 Table 2. Cadmium content in the liver of commercial fish of the Barents Sea

Вид рыбы	Диапазон содержания, мг/кг	Среднее содержание $\pm m$ / медиана, мг/кг сырой массы	Стандартное отклонение	Превышение содержания в мышцах, раз
<i>Gadus morhua</i>	0,0–1,20	$\frac{0,243 \pm 0,018}{0,182}$	0,20	11,0
<i>Melanogrammus aeglefinus</i>	0,01–9,23	$\frac{0,260 \pm 0,038}{0,178}$	0,60	13,7
<i>Hippoglossoides platessoides</i>	0,01–3,11	$\frac{0,299 \pm 0,030}{0,196}$	0,38	14,2
<i>Reinhardtius hippoglossoides</i>	0,003–1,80	$\frac{0,304 \pm 0,037}{0,196}$	0,33	16,9
<i>Pleuronectes platessa</i>	0,019–2,30	$\frac{0,310 \pm 0,041}{0,173}$	0,35	12,4
<i>Anarhichas minor</i>	0,07–1,93	$\frac{0,370 \pm 0,043}{0,291}$	0,31	12,3

Примечание: m – стандартная ошибка среднего арифметического.

ТР ТС 021/2011–0,7 мг/кг сырой массы. Отмеченное превышение норматива содержания Cd в печени изменялось у разных рыб от 2,2% исследованных экз. (треска) до 5,7–8,1% экз. (камбала-ёрш, чёрный палтус и морская камбала). Поскольку печень последних трёх рыб в пищу практически не используется, то говорить о какой-либо проблеме высокого содержания Cd в данном случае не приходится.

По среднему значению для всех исследованных видов рыб превышение норматива содержания Cd в печени не наблюдалось, в том числе и на уровне верхней границы 95%-ного доверительного интервала среднего арифметического.

Статистический анализ данных показал, что распределение величин накопления Cd в печени почти всех исследованных рыб отличалось от нормального по критерию Колмогорова-Смирнова. Нормальным было только распределение Cd в печени пёстрой зубатки ($p < 0,15$).

Статистическая обработка представленных данных показала, что имеют место значимые различия в содержании Cd в печени исследованных нами рыб согласно однофакторному критерию Краскела-Уоллиса ($p = 0,000$). На основании парного критерия Манна-Уитни было установлено, что содержание Cd в печени пёстрой зубатки было значимо больше, чем в печени трески ($p = 0,000$) и достоверно отличалось от его содержания в печени пикши ($p = 0,000$), камбалы-ерша ($p = 0,008$), палтуса ($p = 0,03$) и морской камбалы ($p = 0,03$). Таким образом, содержание Cd в печени зубатки достоверно отличалось от всех остальных рыб. Содержание Cd в печени пикши достоверно

отличалось от его содержания в печени палтуса ($p = 0,04$).

Известно, что камбала-ёрш мало питается в декабре-январе, а преднерестовая и нерестящаяся рыба практически не питается в марте-апреле [Ихтиофауна и условия..., 1986]. По нашим данным, этот факт подтверждается тем, что у камбалы-ерша в январе-марте, по сравнению с августом-ноябрём, жирность мышц и печени, достоверно ниже (при $p = 0,000$ и $p = 0,01$ соответственно). Для оценки влияния сезонного голодания на содержание Cd в организме рыб мы сравнили накопление этого металла в мышцах и печени камбалы-ерша в различные сезоны. Анализ данных с использованием критерия Манна-Уитни показал, что содержание Cd в печени половозрелых самок камбалы-ерша в январе-марте также было достоверно ниже такового в августе-ноябре ($p = 0,002$) (рис. 3). Из экземпляров, выловленных в марте, в анализ были включены лишь преднерестовые и нерестящиеся рыбы. Уровень содержания Cd в мышцах камбалы-ерша в эти периоды статистически значимо не различался ($p = 0,09$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно данным H. Ervik с соавторами [2018], содержание Cd в мышцах трески из прибрежной зоны Норвегии (Норвежское море) составляло 0,021–0,027 мг/кг сырой массы, что практически совпадает с нашими результатами. В мышцах палтуса по тем же данным содержание Cd было ниже предела обнаружения.

Выполненный ранее группой немецких учёных анализ содержания Cd в мышцах атлантической тре-

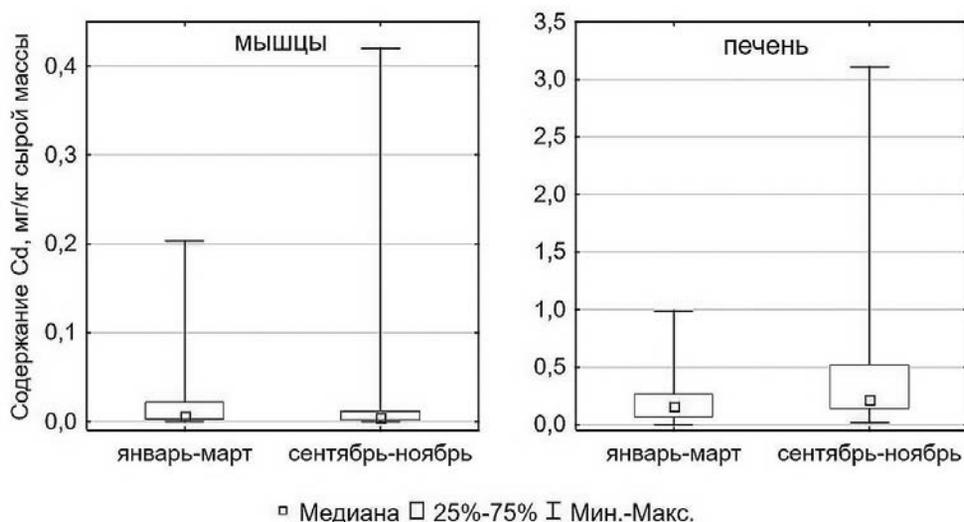


Рис. 3. Сравнительное содержание кадмия в мышцах и печени камбалы-ерша в зависимости от сезона, мг/кг (Различия в содержания кадмия в печени рыб достоверны)

Fig. 3. Comparative cadmium content in the muscle and liver of long rough dab depending on the season, mg/kg (The differences in cadmium content in the fish liver are significant)

ски, отобранной на станциях в Норвежском и Баренцевом морях и в районе Гренландии (съёмки 2006–2010 гг.), также выявил очень низкие значения от <0,0002 до 0,0010 мг/кг сырой массы ($n = 25$) [Karl et al., 2016]. Содержание Cd в печени трески данными авторами не исследовалось.

Среднее геометрическое значение содержания Cd в мойве (*Mallotus villosus* Müller, 1776, тушка) из района Гренландии составляло – 0,029 мг/кг сырой массы, пятнистой зубатки в мышцах – < 0,015, а в печени от 1,15 до 2,11 мг/кг; у гренландской трески (*Gadus ogac* Richardson, 1836) в мышцах – < 0,015; у полярной трески (*Arctogadus glacialis* (Peters, 1872)) в мышцах – < 0,015; у чёрного палтуса в мышцах – < 0,015, в печени – 0,709 мг/кг сырой массы; у сайки в мышцах – 0,036, в печени – 0,802 мг/кг сырой массы [Dietz et al., 1996]. Отметим, что рыбы с содержанием указанного нами фонового уровня содержания Cd в мышцах 0,1 мг/кг тоже не отмечаются. В то же время уровень накопления Cd в печени морских рыб по сравнению с мышцами, согласно приведённым выше данным, чрезвычайно велик, достигает 50 и более раз.

Норвежскими исследователями установлено, что содержание Cd в мышцах чёрного палтуса из Норвежского моря ($n = 320$), выловленного в мае 2006 г., варьировало от меньше предела обнаружения (< 0,001) до 0,02 мг/кг сырой массы; возраст пойманных рыб варьировал от 12 до 29 лет, а вес от 1,1 до 8,1 кг [Julshamn et al., 2011]. Эти данные в целом согласуются с нашими, однако, отмеченное нами среднее содержание Cd в рыбе из Баренцева моря было немного выше.

Считают, что низкое содержание Cd в мышцах морских рыб Арктики – обычное явление [Riget et al., 1997; 2000; Julshamn et al., 2004]. Современный норматив содержания Cd в мышцах промысловых рыб, принятый в Евросоюзе, составляет 0,05 мг/кг сырой массы, но для отдельных видов рыб он принят за 0,1 мг/кг [E.U., 2023³].

Для сравнения также можно привести некоторые данные по сем. Камбаловых (Pleuronectidae) из других регионов. Так, среднее содержание Cd в мышцах малоротой и колючей камбал из залива Петра Великого (Японское море) было не высоким и составляло около 0,001–0,005 мг/кг [Ковековдова и др., 2016], что почти на порядок меньше такового в морской камбале и камбале-ерше из Баренцева моря (см. табл. 1). Это позволяет говорить о том, что уровень содержания Cd в рыбе, кроме видоспецифичности, может иметь и региональные особенности.

Отсутствие связи содержания Cd в мышцах трески и пикши с их весом и длиной (см. рис. 2), также отмеченное нами ранее для ртути и мышьяка, очевидно, является закономерным явлением [Новиков и др., 2021; 2023; Bank et al., 2021]. Как, впрочем, и значительная вариабельность этой величины у многих морских рыб [АМАР, 2005; Le Croizier et al., 2018]. Полагаем, что в период активного роста рыбы содержание Cd в мышцах может увеличивается за счёт изменения спектра питания и рациона. Это увеличение но-

³ E.U. 2023. Commission Regulation (EU) No 2023/915 of 25 April 2023 amending Regulation (EC) No 1881/2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. Off. J. Eur. Union (L119/103). 55 p.

сит кратковременный характер. С течением времени печень и почки удаляют Cd из быстро растущей мышечной ткани, обеспечивая некий равновесный уровень, гомеостаз. Аналогичные процессы могут протекать при наличии повышенного содержания Cd в среде обитания. Так, например, показано, что при пребывании оливковой камбалы (*Paralichthys olivaceus* Temminck & Schlegel, 1846) в загрязнённой кадмием воде уровень его содержания в мышцах значительно возрастает в течении 20 суток [Kim et al., 2004].

В рыбе Cd в основном накапливается в почках и печени, а содержание в мышцах, как правило, низкое [Моисеенко, Гашкина, 2018; Bjerregaard et al., 2014; Yeşilbudak, Erdem, 2014; Karl et al., 2016; Liu et al., 2022].

Концентрация Cd в рыбе обычно убывает в следующем порядке: кишечник>печень>почки>жабры>мышцы. После попадания Cd с пищей в организм рыбы его поглощение начинается в кишечнике через мембранные транспортёры, посредством белков-переносчиков или каналы эссенциальных элементов. Таким образом, накопление Cd сначала происходит в пищеварительном тракте. Достигнув печени, Cd высвобождается в общий кровоток и, наконец, достигает органов вторичного накопления, таких как мышцы [Berntssen et al., 2001; Kim et al., 2006; Le Croizier et al., 2018].

Известна негативная роль Cd в развитии патологии почек рыб. Так, с помощью иммунного анализа была показана возможность развития вторичного гломерулонефрита после повреждения почек Cd, Hg и Bi [Singhal, Jain, 1997]. Также установлено, что экспериментальная интоксикация кадмием приводит к морфологическим изменениям в почках карпа *Cyprinus carpio* L., 1758, которые проявляются в виде увеличения размеров почечной капсулы, капиллярного клубочка и количества клеток в сосудистом клубочке [Крючков и др., 2018].

Концентрация Cd в печени различных рыб из высоких широт может изменяться в широком диапазоне: от 0,034 до 2,11 мг/кг сырой массы [Dietz et al., 1996]. Однако, у сига из оз. Имандра (Кольский п-ов) среднее содержание Cd в печени варьировало в диапазоне 0,11–0,24 мг/кг сухой массы в зависимости от плёса [Гашкина и др., 2022]. В пересчёте на сырую массу это составило примерно 0,02–0,05 мг/кг, что в разы меньше полученных нами для морских рыб величин (см. табл. 2), но согласуется с нашими фондовыми данными по сигам из водоёмов Кольского п-ова. Для перевода значений с сухой массы на сырую массу использовали переводной коэффициент 4,8 для печени омуля (*Coregonus autumnalis migratorius* (Georgi, 1775))

[Ветров и др., 1989]. Таким образом, можно констатировать, что пресноводные рыбы Арктики содержат гораздо меньше Cd в печени, чем морские, что, вероятно, связано с их питанием.

Содержание Cd в печени проходной горбуши (*Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum, 1792)) из р. Кола (Кольский п-ов) в 2019 г. составило 0,122 мг/кг сырой массы, что в 24,4 раза превышало его содержание в мышцах [Христофорова и др., 2023] и было близко к содержанию Cd в печени морских рыб.

Содержание Cd в печени арктического гольца (*Salvelinus alpinus* L., 1758) из канадской Арктики изменяется от 0,17 до 4,24 мг/кг сухой массы со средним значением 0,76 мг/кг сухой массы ($n=59$), или около 0,16 мг/кг сырой массы. Это в 40 раз выше, чем в мышцах. При этом, содержание Cd в печени гольца в отличие от его содержания в мышцах зависело от сезона отбора проб: летом оно было почти в 2 раза ниже, чем зимой [Mackenzie-Martyniuk et al., 2020].

Приведённые выше данные подтверждают полученные нами результаты, свидетельствующие о высокой способности Cd накапливаться в печени рыб, т. е. его способности к биоаккумуляции. Для многих представителей ихтиофауны показано, что Cd намного больше в печени, чем в мышцах, причём, уровень накопления в печени зависит от дозы – уровня присутствия в окружающей среде и в пище [Моисеенко, Гашкина, 2018; Berntssen et al., 2001; Kim et al., 2006; Le Croizier et al., 2018]. Способность к значительному накоплению Cd в печени рыб обусловлено активным участием этого органа в процессах их детоксикации с участием, в частности, металлотионеинов [Fernandes et al., 2008].

Весьма высокая изменчивость его содержания в мышцах ($CV=124-200$, см. также табл. 1) с учётом стабильно низкого уровня содержания в воде и донных отложениях Баренцева моря [Новиков, 2017; Новиков, Драганов, 2017], свидетельствуют в пользу того, что эта изменчивость в основном определяется рационом, что подтверждается многими исследователями [Аууат et al., 2017; Liu et al., 2022]. Мы видим также, что Cd способен накапливаться в печени рыб в больших количествах и выводиться оттуда, о чём свидетельствуют высокие значения изменчивости его содержания ($CV = 82-231$, см. также табл. 2). Полученные нами данные о снижении содержания Cd в печени камбалы-ерша в период низкой интенсивности питания зимой и в период нереста подтверждает возможность эффективного его удаления, очевидно, при выделении желчи, почти не участвующей в переваривании пищи.

В экспериментах с европейским морским окунем (*Dicentrarchus labrax* (L., 1758)) и сенегальской камба-

лой (*Solea senegalensis* Kaup, 1858) показано, что в то время как количество Cd в мышцах оставалось относительно постоянным, в печени наблюдалось значительное выведение металла после двух месяцев кормления гранулами, содержащими Cd, что совпадало с эффективной экскрецией с желчью исследованных рыб [Le Croizier et al., 2018].

Высокий уровень накопления тяжёлых металлов, способных замещать эссенциальные (биофильные) элементы, таких как Cd и свинец (Pb), может приводить к подавлению ферментативной активности систем организма. Таким образом Cd, как и Pb, является тиоловым ядом: он инактивирует ферменты и нарушает функции структурных белков. С повышением температуры токсичность Cd для некоторых гидробионтов, в частности, для ракообразных, возрастает. В то же время Cd снижает накопление гидробионтами Zn, Cu и других металлов [Моисеенко, 2015; Филенко, Михеева, 2007; Liu et al., 2022]. Для пресноводных рыб показано, что острое воздействие Cd приводит к снижению активности карбоангидразы и Na⁺/K⁺-АТФ-азы в жабрах и почках, а также активности жабберной Ca²⁺-АТФ-азы, что приводит к потере рыбами способности регулировать уровень кальция в крови [Sylva, Martinez, 2014].

Рыба способна выводить из организма кадмий, ртуть, свинец и другие тяжёлые металлы. Из мышц и скелета микроэлементы выводятся крайне медленно по сравнению с печенью [Моисеенко, 2015; Hodson, 1988; Heath, 2002]. Печень участвует в метаболизме загрязняющих веществ, что делает её и мишенью, и органом, который сам защищает себя [Гашкина и др., 2022; Hinton et al., 2017]. Удаление Cd из печени рыб происходит в основном с участием металлотеининов за счёт перемещения в другие ткани, такие как мышцы, путём высвобождения в общий кровоток либо путём удаления с желчью или мочой. После перемещения в мышцы Cd почти не выводится из них и в течение длительного периода остаётся на том же уровне [Kim et al., 2004; 2006; McGeer et al., 2011; Yeşilbudak, Erdem, 2014].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённых исследований показано, что для промысловых рыб Баренцева моря характерно относительно невысокое природное содержание кадмия в мышцах и печени. Случаи превышения нормативов имели единичный характер и, по всей видимости, являлись выбросами. Каких-либо признаков антропогенного загрязнения исследованных промысловых рыб Баренцева моря Cd не обнаружено.

Уровню содержания Cd в мышцах рыб присуща видоспецифичность. Наибольшее среднее содержание Cd в мышцах и печени характерно для пёстрой зубатки (*A. minor*). Значительное повышение содержания Cd в мышцах рыбы в течение длительного периода, вероятно, свидетельствует о нарушении гомеостаза внутренней среды, что может привести к гибели рыбы.

Отмечена высокая способность Cd накапливаться в печени морских рыб. Содержание Cd в печени рыб в среднем более, чем в 13 раз превышает его содержание в мышцах. Накопление и удаление Cd из печени рыб является важным механизмом его детоксикации и поддержания гомеостаза в организме.

Определяющее влияние на уровень содержания Cd в рыбе, очевидно, оказывает рацион, т. е. металл поступает в организм преимущественно с пищей.

Предложен расчётный фоновый уровень содержания Cd в мышцах промысловых рыб Баренцева моря. Фоновый уровень отражает современное естественное содержание Cd в ихтиофауне региона и может быть использован для выявления антропогенного воздействия на экосистему.

Благодарности

Авторы благодарят главного специалиста лаборатории химико-аналитических исследований «ПИНРО» им. Н.М. Книповича Лаптеву А.М. за неоценимую помощь в химическом анализе проб рыбы на содержание кадмия.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания «ПИНРО» им. Н.М. Книповича по теме «Оценка состояния, распределения, численности и воспроизводства водных биологических ресурсов, а также среды их обитания».

ЛИТЕРАТУРА

- Бойцов В.Д., Лебедь Н.И., Пономаренко В.П., Пономаренко И.Я., Терещенко В.В., Третьяк В.Л., Шевелёв М.С., Ярагина Н.А. 2003. Треска Баренцева моря: биология и промысел. Изд. 2-е. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 296 с.
- Васильков Г.В. Грищенко Л.И., Енгашев В.Г. 1989. Болезни рыб. Справочник / В.С. Осетрова ред. М.: Агропромиздат. 288 с.

- Ветров В.А., Корнакова Э.Ф., Кузнецова А.И., Коробейникова Л.Г. 1989. Содержание металлов в рыбах Байкала // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. 12. С. 88–100.
- Гашкина Н.А., Моисеенко Т.И., Шуман Л.А., Королева И.М. 2022. Роль микроэлементов в адаптации метаболизма рыб к снижению загрязнения (на примере субарктического оз. Имандра) // Геохимия. Т. 67, № 2. С. 119–135. DOI: 10.31857/S0016752522020054
- Диагностический анализ состояния окружающей среды Арктической зоны Российской Федерации. 2011 / Отв. ред. Б.А. Моргунов. М.: Научный мир. 1260 с.
- Долгов А.В. 2016. Состав, формирование и трофическая структура ихтиоценозов Баренцева моря. Мурманск: ПИПРО. 336 с.
- Изучение экосистем рыбохозяйственных водоёмов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи и переработки. 2004. Вып. 1. Инструкции и методические рекомендации по сбору и обработке биологической информации в морях Европейского Севера и Северной Атлантики. М.: ВНИРО. 299 с.
- Ковековдова Л.Т., Кику Д.П., Касьяненко И.С. 2016. Мониторинг водной среды и безопасности промысловых объектов в дальневосточном рыбохозяйственном бассейне (токсичные элементы) // Морские биологические исследования: достижения и перспективы: в 3-х т. Мат. Всерос. научно-практ. конф. с межд. участием, приуроченной к 145-летию Севастопольской биологической станции. Севастополь: Изд-во ЭКОСИ-Гидрофизика. Т. 3. С. 111–114.
- Крючков В.Н., Бутаева Н.Б., Омарова Х.Г., Дубовская А.В. 2018. Влияние экспериментальной интоксикации кадмием на морфофункциональные показатели почек рыб // Вестник ДГУ. Серия 1. Естественные науки. Т. 33. Вып. 4. С. 121–128.
- Метелев В.В., Канаев А.И., Дзасохова Н.Г. 1971. Водная токсикология. М.: Колос. 247 с.
- Моисеенко Т.И. 2015. Влияние геохимических факторов водной среды на биоаккумуляцию металлов в организме рыб // Геохимия. № 3. С. 222–233.
- Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. 2018. Биогеохимия кадмия: антропогенное рассеивание, биоаккумуляция и экотоксичность // Геохимия. № 8. С. 759–773. DOI: 10.1134/S001675251808006X
- Новиков М.А., Горбачева Е.А., Лаптева А.М. 2021. Содержание мышьяка в промысловых рыбах Баренцева моря (по многолетним данным) // Известия ТИНРО. Т. 201, № 4. С. 833–844. DOI: 10.26428/1606-9919-2021-201-833-844
- Новиков М.А., Горбачева Е.А., Харламова М.Н. 2023. Содержание ртути в промысловых рыбах Баренцева моря (по многолетним данным) // Труды ВНИРО. Т. 191. С. 112–123. DOI: 10.36038/2307-3497-2023-191-112-1
- Новиков М.А. 2017. К вопросу о фоновых значениях уровней содержания тяжёлых металлов в донных отложениях Баренцева моря // Вестник МГТУ. Т. 20, № 1–2. С. 280–288. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-280-288
- Новиков М.А., Драганов Д.М. 2017. Комплексный методический подход к определению фоновых значений уровней содержания микроэлементов в водных массах Баренцева моря на примере Cd, Co, Cu и Ni // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. Вып. 34, № 2. С. 37–48.
- Филенко О.Ф., Михеева И.В. 2007. Основы водной токсикологии. М.: Колос. 144 с.
- Христофорова Н.К. 1989. Биоиндикация и мониторинг загрязнения морских вод тяжёлыми металлами. Л.: Наука. 192 с.
- Чибисова Н.В., Долгань Е.К. 1998. Экологическая химия. Калининград: КГУ. 113 с.
- AMAP. 2005. AMAP Assessment 2002: Heavy Metals in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. xvi + 265 pp. (first published as electronic document in 2004).
- Ayyat M.S., Mahmoud H.K., El-Hais A.E.-A.M., Abd El-Latif K.M. 2017. The role of some feed additives in fish fed on diets contaminated with cadmium // Environ. Sci. Pollut. Res. V. 24. P. 23636–23645. DOI: 10.1007/s11356-017-9986-1
- Bank M.S., Frantzen S., Duinker A., Amouroux D., Tessier E., Nedreaas K., Maage A., Nilsen B.M. 2021. Rapid Temporal Decline of Mercury in Greenland Halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) // Environ. Pollut. V. 289. Is. 117843. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117843
- Berntssen M.H.G., Aspholm O.Ø., Hylland K., Wendelaar Bonga S.E., Lundebye A.-K. 2001. Tissue metallothionein, apoptosis and cell proliferation responses in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) parr fed elevated dietary cadmium // Comp. Biochem. Physiol. Toxicol. Pharmacol. V. 128. P. 299–310. DOI: 10.1016/S1532-0456(00)00204-0
- Bjerregaard P., Andersen C., Andersen O. 2014. Ecotoxicology of metals – sources, transport, and effects on the ecosystem // Handbook on the Toxicology of Metals / Nordberg G.F., Fowler B.A., Nordberg M. eds. Elsevier Science, Amsterdam. P. 425–459.
- Dehn L.-A., Follmann E.H., Thomas D.L., Sheffield G.G., Rosa Ch., Duffy L.K., O'Hara T.M. 2006. Trophic relationships in an Arctic food web and implications for trace metal transfer // Sci. Total Environ. V. 362 (1–3). P. 103–123. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.11.012
- Dietz R., Riget F., Johansen P. 1996. Lead, cadmium, mercury and selenium in Greenland marine animals // Sci. Total Environ. V.186. P. 67–93.
- Ervik H., Finne T.E., Jenssen B.M. 2018. Toxic and essential elements in seafood from Mausund, Norway // Environ. Sci. Pollut. Res. P. 1–9.
- Fernandes D., Bebianno M.J., Porte C. 2008. Hepatic levels of metal and metallothioneins in two commercial fish species of the Northern Iberian shelf // Sci. Total Environ. V. 391. P. 159–167. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.10.057
- Fernandes D., Porte C., Bebianno M.J. 2007. Chemical residues and biochemical responses in wild and cultured European

- sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) // Environ. Res. V. 103. P. 247–256. DOI: 10.1016/j.envres.2006.05.015
- Gashkina N.A., Moiseenko T.I., Kudryavtseva L.P. 2020. Fish response of metal bioaccumulation to reduced toxic load on long-term contaminated lake Imandra // Ecotoxicology and Environmental Safety. V.191: 110205.
- Heath A.G. 2002. Water Pollution and Fish Physiology. Lewis Publishers. 506 p.
- Hinton D.E., Baumann P.C., Gardner G.C., Hawkins W.E., Hendricks J.D., Murchelano R.A., Okihiro M.S. 2017. Histopathologic biomarkers // Biomarkers: Biochemical, Physiological and Histological Markers of Anthropogenic Stress / Huggett R.J., Kimerly R.A. et al. eds. Boca Raton, London, N.Y.: CRC Press. 155–210 p.
- Hodson P.V. 1988. The effect of metabolism on uptake, disposition and toxicity in fish // Aquatic Toxicology. V. 11. P. 3–18.
- Julshamn K., Lundebye A.K., Heggstad K., Berntssen M.H., Bøe B. 2004. Norwegian monitoring programme on the inorganic and organic contaminants in fish caught in the Barents Sea, Norwegian Sea and North Sea, 1994–2001 // Food Additives and Contaminants. V. 21. P. 365–376.
- Julshamn K., Frantzen S., Valdernes S., Nilsen B., Maage A., Nedreaas K. 2011. Concentrations of mercury, arsenic, cadmium and lead in Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) caught off the coast of northern Norway // Marine Biology Research. V. 7 (8). P. 733–745. DOI: 10.1080/17451000.2011.594893
- Karl H., Kammann U., Aust M.-O., Manthey-Karl M., Lüth A., Kanisch G. 2016. Large scale distribution of dioxins, PCBs, heavy metals, PAH-metabolites and radionuclides in cod (*Gadus morhua*) from the North Atlantic and its adjacent seas // Chemosphere. V. 149. P. 294–303. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.01.052
- Kim S.-G., Eom K.-H., Kim S.-S., Jin H.-G., Kang J.-C. 2006. Kinetics of Cd accumulation and elimination in tissues of juvenile rockfish (*Sebastes schlegeli*) exposed to dietary Cd // Mar. Environ. Res. V. 62. P. 327–340. DOI: 10.1016/j.marenvres.2006.05.001
- Kim S.-G., Jee J.-H., Kang J.-C. 2004. Cadmium accumulation and elimination in tissues of juvenile olive flounder, *Paralichthys olivaceus* after sub-chronic cadmium exposure // Environ. Pollut. V. 127. P. 117–123. DOI: 10.1016/S0269-7491(03)00254-9
- Le Croizier G., Lacroix C., Artigaud S., Le Floch S., Raffray J., Penicaud V., Coquillé V., Autiera J., Rouget M.-L., Le Bayond N., Lae R., De Moraisa L.T. 2018. Significance of metallothioneins in differential cadmium accumulation kinetics between two marine fish species // Environ. Pollut. V. 236. P. 462–476. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.01.002
- Liu Y., Chen Q., Li Y., Bi L., Jin L., Peng R. 2022. Toxic Effects of Cadmium on Fish // Toxics. V. 10, 622. 19 p. DOI: 10.3390/toxics10100622
- Mackenzie Martyniuk A.C., Couture P., Tran L., Beaupré L., Urien N., Power M. 2020. A seasonal comparison of trace metal concentrations in the tissues of Arctic charr (*Salvelinus alpinus*) in Northern Québec, Canada // Ecotoxicology. V. 29. P. 1327–1346. DOI: 10.1007/s10646-020-02248-7
- McGeer J.C., Niyogi S., Scott Smith D. 2011. Cadmium // Fish Physiology, Homeostasis and Toxicology of Non-essential Metals. Volume 31B / Wood C.M., Farrell A.P., Brauner C.J. eds. London: Academic Press. P. 125–184.
- Riget F., Dietz R., Johansen P. 1997. Zinc, cadmium, mercury and selenium in Greenland fish // Bioscience. V. 48. 29 p.
- Riget F., Dietz R., Johansen P., Asmund G. 2000. Lead, cadmium, mercury and selenium in Greenland marine biota and sediments during AMAP phase 1 // Science of the Total Environment. V.245. P. 3–14.
- Sierra-Marquez L., Espinosa-Araujo J., Atencio-Garcia V., Olivero-Verbel J. 2019. Effects of cadmium exposure on sperm and larvae of the neotropical fish *Prochilodus magdalenae* // Comparative Biochem. and Physiol., Part C.V. 225:108577. DOI: 10.1016/j.cbpc.2019.108577.
- Singhal R.N., Jain M. 1997. Cadmium-induced changes in the histology of kidneys in common carp, *Cyprinus carpio* (Cyprinidae) // Bull. Environ. Contam. And Toxicol. V. 58, № 3. P. 456–462.
- Siscar R., Koenig S., Torreblanca A., Solé M. 2014a. The role of metallothionein and selenium in metal detoxification in the liver of deep-sea fish from the NW Mediterranean Sea // Sci. Total Environ. V. 466–467. P. 898–905. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.07.081
- Siscar R., Torreblanca A., del Ramo J., Solé M. 2014b. Modulation of metallothionein and metal partitioning in liver and kidney of *Solea senegalensis* after long-term acclimation to two environmental temperatures // Environ. Res., V. 132. P. 197–205. DOI: 10.1016/j.envres.2014.04.020
- Sylva A.O., Martinez C.B. 2014. Acute effects of cadmium on osmoregulation of the freshwater teleost *Prochilodus lineatus*: enzymes activity and plasma ions // Aquat Toxicol. V. 156. P. 161–168. DOI: 10.1016/j.aquatox.2014.08.009
- Thophon S., Kruatrachue M., Upatham E.S., Pokethitiyook P., Sahaphong S., Jaritkhuan S. 2003. Histopathological alterations of white seabass, *Lates calcarifer*, in acute and subchronic cadmium exposure // Environ. Pollution. V.121. P. 307–320. DOI: 10.1016/S0269-7491(02)00270-1
- Yeşilbudak B., Erdem C. 2014. Cadmium accumulation in gill, liver, kidney and muscle tissues of Common carp, *Cyprinus carpio*, and Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 92, 546–550. DOI: 10.1007/s00128-014-1228-3
- Zauke G.P., Schmalenbach, I. 2006. Heavy metals in zooplankton and decapod crustaceans from the Barents Sea // Sci. Total Environ. V. 359. P. 283–294. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.09.002.

REFERENCES

- Boytsova V.D., Lebed N.I., Ponomarenko V.P., Ponomarenko I.Ya., Tereshchenko V.V., Tretyak V.L., Shevelev M.S., Yaragina N.A. 2003. Cod of the Barents Sea: biology and fishery. 2nd ed. Murmansk: PINRO Publish. 296 p. (In Russ.).

- Vasil'kov G.V., Grishchenko L.I., Engashev V.G. 1989 Fish diseases. Handbook / V.S. Osetrov. ed. Moscow: Agropromizdat. 288 p. (In Russ.).
- Vetrov V.A., Kornakova E.F., Kuznetsova A.I., Korobeynikova L.G. 1989. Metal content in Baikal fish // Problems of environmental monitoring and modeling of ecosystems. V. 12. P. 88–100. (In Russ.).
- Gashkina N.A., Moiseenko T.I., Shuman L.A., Koroleva I.M. The role of trace elements in the adaptation of fish metabolism under reduced pollution: a case study of the subarctic Lake Imandra // Geochemistry International. 2022. V. 60. № 2. C. 154–169. DOI: 10.1134/S0016702922020057 (In Russ.).
- Diagnostic analysis of the state of the environment in the Arctic zone of the Russian Federation. 2011 / Responsible ed. B.A. Morgunov. Moscow: Nauchnyy mir. 1260 p. (In Russ.).
- Dolgov A.V. 2016. Composition, formation and trophic structure of the Barents Sea fish communities. Murmansk: PINRO Publish. 336 pp. (In Russ.).
- Study of ecosystems of fishery water reservoirs, collection and processing of data on aquatic biological resources, techniques and technology for their extraction and processing. 2004. Instructions and guidelines for the collection and processing of data on the seas of the European North and the North Atlantic. Moscow: VNIRO Publish. 299 p. (In Russ.).
- Kovekovdova L.T., Kiku D.P., Kasyanenko I.S. 2016. Monitoring of water environment and food safety of commercial objects in the Far East fishery basin (toxic elements) // Marine biological research: achievements and prospects: 3-h t. Mat. All-russ. scint.-pract. conf. with intern. participation, to the 145th anniversary of the Sevastopol Biological Station. Sevastopol: EHKOSI-Gidrofizika Publsh. V. 3. P. 111–114. (In Russ.).
- Kryuchkov V.N., Butaeva N.B., Omarova Kh.G., Dubovskaya A.V. 2018. The influence of experimental cadmium intoxication on the morphofunctional parameters of fish kidneys // Vestnik DSU. Series 1. Natural Sciences. V. 33. Iss. 4. P. 121–128. (In Russ.).
- Metelev V.V., Kanaev A.I., Dzasokhova N.G. 1971. Aquatic toxicology. Moscow: Kolos. 247 p. (In Russ.).
- Moiseenko T.I. 2015. Impact of geochemical factors of aquatic environment on the metal bioaccumulation in fish // Geochemistry International. T. 53. № 3. C. 213–223. DOI: 10.1134/S001670291503009X (In Russ.).
- Moiseenko T.I., Gashkina N.A. 2018. Biogeochemistry of cadmium: anthropogenic dispersion, bioaccumulation, and ecotoxicity // Geochemistry International. V. 56. № 8. C. 798–811. DOI: 10.1134/S0016702918080062 (In Russ.).
- Novikov M.A., Gorbacheva E.A., Lapteva A.M. 2021. Arsenic content in commercial fish of the Barents Sea (according to long-term data) // Izvestiya TINRO. V. 201, № 4. P. 833–844. DOI: 10.26428/1606-9919-2021-201-833-844. (In Russ.).
- Novikov M.A., Gorbacheva E.A., Kharlamova M.N. 2023. Mercury content in commercial fishes of the Barents Sea (based on long-term data) // Trudy VNIRO. V. 191. P. 112–123. DOI: 10.36038/2307-3497-2023-191-112-1 (In Russ.).
- Novikov M.A. 2017. On the background values of heavy metals in bottom sediments of the Barents Sea // Vestnik of MSTU. V. 20, No. 1–2. P. 280–288. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-280-288 (In Russ.).
- Novikov M.A., Draganov D.M. 2017. Complex methodological approach to estimation of background levels of microelements content in water masses of the Barents Sea (Cd, Co, Cu and Ni) // Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle (Geosciences). Iss. 34, No. 2. P. 37–48. (In Russ.).
- Filenko O.F., Mikheeva I.V. 2007. Fundamentals of aquatic toxicology. Moscow: Kolos. 144 p. (In Russ.).
- Khristoforova N.K. 1989. Bioindication and monitoring of sea water pollution with heavy metals. Lenindrad: Nauka. 192 p. (in Russ.).
- Chibisova N.V., Dolgan' E.K. 1998. Environmental chemistry: Textbook. Kaliningrad: KSU. 113 p. (In Russ.).
- AMAP. 2005. AMAP Assessment 2002: Heavy Metals in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. xvi + 265 pp. (first published as electronic document in 2004).
- Ayyat M.S., Mahmoud H.K., El-Hais A.E.-A.M., Abd El-Latif K.M. 2017. The role of some feed additives in fish fed on diets contaminated with cadmium // Environ. Sci. Pollut. Res. V. 24. P. 23636–23645. DOI: 10.1007/s11356-017-9986-1
- Bank M.S., Frantzen S., Duinker A., Amouroux D., Tessier E., Nedreaas K., Maage A., Nilsen B.M. 2021. Rapid Temporal Decline of Mercury in Greenland Halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) // Environ. Pollut. V. 289. Is. 117843. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117843
- Berntssen M.H.G., Aspholm O.Ø., Hylland K., Wendelaar Bonga S.E., Lundebye A.-K. 2001. Tissue metallothionein, apoptosis and cell proliferation responses in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) parr fed elevated dietary cadmium // Comp. Biochem. Physiol. Toxicol. Pharmacol. V. 128. P. 299–310. DOI: 10.1016/S1532-0456(00)00204-0
- Bjerregaard P., Andersen C., Andersen O. 2014. Ecotoxicology of metals – sources, transport, and effects on the ecosystem // Handbook on the Toxicology of Metals / Nordberg G.F., Fowler B.A., Nordberg M. eds. Elsevier Science, Amsterdam. P. 425–459.
- Dehn L.-A., Follmann E.H., Thomas D.L., Sheffield G.G., Rosa Ch., Duffy L.K., O'Hara T.M. 2006. Trophic relationships in an Arctic food web and implications for trace metal transfer // Sci. Total Environ. V. 362 (1–3). P. 103–123. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.11.012
- Dietz R., Riget F., Johansen P. 1996. Lead, cadmium, mercury and selenium in Greenland marine animals // Sci. Total Environ. V.186. P. 67–93.
- Ervik H., Finne T.E., Jenssen B.M. 2018. Toxic and essential elements in seafood from Mausund, Norway // Environ. Sci. Pollut. Res. P. 1–9.
- Fernandes D., Bebianno M.J., Porte C. 2008. Hepatic levels of metal and metallothioneins in two commercial fish species of the Northern Iberian shelf // Sci. Total Environ. V. 391. P. 159–167. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.10.057

- Fernandes D., Porte C., Bebianno M.J. 2007. Chemical residues and biochemical responses in wild and cultured European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) // Environ. Res. V. 103. P. 247–256. DOI: 10.1016/j.envres.2006.05.015
- Gashkina N.A., Moiseenko T.I., Kudryavtseva L.P. 2020. Fish response of metal bioaccumulation to reduced toxic load on long-term contaminated lake Imandra // Ecotoxicology and Environmental Safety. V.191: 110205.
- Heath A.G. 2002. Water Pollution and Fish Physiology. Lewis Publishers. 506 p.
- Hinton D.E., Baumann P.C., Gardner G.C., Hawkins W.E., Hendricks J.D., Murchelano R.A., Okihiro M.S. 2017. Histopathologic biomarkers // Biomarkers: Biochemical, Physiological and Histological Markers of Anthropogenic Stress / Huggett R.J., Kimerly R.A. et al. eds. Boca Raton, London, N.Y.: CRC Press. 155–210 p.
- Hodson P.V. 1988. The effect of metabolism on uptake, disposition and toxicity in fish // Aquatic Toxicology. V. 11. P. 3–18.
- Julshamn K., Lundebye A.K., Heggstad K., Berntssen M.H., Bøe B. 2004. Norwegian monitoring programme on the inorganic and organic contaminants in fish caught in the Barents Sea, Norwegian Sea and North Sea, 1994–2001 // Food Additives and Contaminants. V. 21. P. 365–376.
- Julshamn K., Frantzen S., Valdersnes S., Nilsen B., Maage A., Nedreaas K. 2011. Concentrations of mercury, arsenic, cadmium and lead in Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) caught off the coast of northern Norway // Marine Biology Research. V. 7 (8). P. 733–745. DOI: 10.1080/17451000.2011.594893
- Karl H., Kammann U., Aust M.-O., Manthey-Karl M., Lüth A., Kanisch G. 2016. Large scale distribution of dioxins, PCBs, heavy metals, PAH-metabolites and radionuclides in cod (*Gadus morhua*) from the North Atlantic and its adjacent seas // Chemosphere. V. 149. P. 294–303. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.01.052
- Kim S.-G., Eom K.-H., Kim S.-S., Jin H.-G., Kang J.-C. 2006. Kinetics of Cd accumulation and elimination in tissues of juvenile rockfish (*Sebastes schlegeli*) exposed to dietary Cd // Mar. Environ. Res. V. 62. P. 327–340. DOI: 10.1016/j.marenvres.2006.05.001
- Kim S.-G., Jee J.-H., Kang J.-C. 2004. Cadmium accumulation and elimination in tissues of juvenile olive flounder, *Paralichthys olivaceus* after sub-chronic cadmium exposure // Environ. Pollut. V. 127. P. 117–123. DOI: 10.1016/S0269-7491(03)00254-9
- Le Croizier G., Lacroix C., Artigaud S., Le Floch S., Raffray J., Penicaud V., Coquillé V., Autiera J., Rouget M.-L., Le Bayond N., Lae R., De Moraisa L.T. 2018. Significance of metallothioneins in differential cadmium accumulation kinetics between two marine fish species // Environ. Pollut. V. 236. P. 462–476. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.01.002
- Liu Y., Chen Q., Li Y., Bi L., Jin L., Peng R. 2022. Toxic Effects of Cadmium on Fish // Toxics. V. 10, 622. 19 p. DOI: 10.3390/toxics10100622
- Mackenzie Martyniuk A.C., Couture P., Tran L., Beaupré L., Urien N., Power M. 2020. A seasonal comparison of trace metal concentrations in the tissues of Arctic charr (*Salvelinus alpinus*) in Northern Québec, Canada // Ecotoxicology. V. 29. P. 1327–1346. DOI: 10.1007/s10646-020-02248-7
- McGeer J.C., Niyogi S., Scott Smith D. 2011. Cadmium // Fish Physiology, Homeostasis and Toxicology of Non-essential Metals. Volume 31B / Wood C.M., Farrell A.P., Brauner C.J. eds. London: Academic Press. P. 125–184.
- Riget F., Dietz R., Johansen P. 1997. Zinc, cadmium, mercury and selenium in Greenland fish // Bioscience. V. 48. 29 p.
- Riget F., Dietz R., Johansen P., Asmund G. 2000. Lead, cadmium, mercury and selenium in Greenland marine biota and sediments during AMAP phase 1 // Science of the Total Environment. V.245. P. 3–14.
- Sierra-Marquez L., Espinosa-Araujo J., Atencio-Garcia V., Olivero-Verbel J. 2019. Effects of cadmium exposure on sperm and larvae of the neotropical fish *Prochilodus magdalenae* // Comparative Biochem. and Physiol., Part C.V. 225:108577. DOI: 10.1016/j.cbpc.2019.108577.
- Singhal R.N., Jain M. 1997. Cadmium-induced changes in the histology of kidneys in common carp, *Cyprinus carpio* (Cyprinidae) // Bull. Environ. Contam. And Toxicol. V. 58, № 3. P. 456–462.
- Siscar R., Koenig S., Torreblanca A., Solé M. 2014a. The role of metallothionein and selenium in metal detoxification in the liver of deep-sea fish from the NW Mediterranean Sea // Sci. Total Environ. V. 466–467. P. 898–905. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.07.081
- Siscar R., Torreblanca A., del Ramo J., Solé M. 2014b. Modulation of metallothionein and metal partitioning in liver and kidney of *Solea senegalensis* after long-term acclimation to two environmental temperatures // Environ. Res., V. 132. P. 197–205. DOI: 10.1016/j.envres.2014.04.020
- Sylva A.O., Martinez C.B. 2014. Acute effects of cadmium on osmoregulation of the freshwater teleost *Prochilodus lineatus*: enzymes activity and plasma ions // Aquat Toxicol. V. 156. P. 161–168. DOI: 10.1016/j.aquatox.2014.08.009
- Thophon S., Kruatrachue M., Upatham E.S., Pokethitiyook P., Sahaphong S., Jaritkhuan S. 2003. Histopathological alterations of white seabass, *Lates calcarifer*, in acute and subchronic cadmium exposure // Environ. Pollution. V.121. P. 307–320. DOI: 10.1016/S0269-7491(02)00270-1
- Yeşilbudak B., Erdem C. 2014. Cadmium accumulation in gill, liver, kidney and muscle tissues of Common carp, *Cyprinus carpio*, and Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 92, 546–550. DOI: 10.1007/s00128-014-1228-3
- Zauke G.P., Schmalenbach, I. 2006. Heavy metals in zooplankton and decapod crustaceans from the Barents Sea // Sci. Total Environ. V. 359. P. 283–294. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.09.002.

Поступила в редакцию 20.03.2024 г.

Принята после рецензии 12.04.2024 г.