



УДК 597.5:549.25 (268.45)

Среда обитания водных биологических ресурсов

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

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

¹Полярный филиал ГНЦ РФ ФГБНУ 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.vniro.ru

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

Цель работы: исследовать уровень содержания свинца 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 2009-2022 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 Pb в шести промысловых рыбах Баренцева моря, определены природные фоновые уровни его содержания, которые можно рассматривать в качестве приемлемых.

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

Результаты: показано, что среднее содержание Pb в мышцах и печени исследованных рыб не превышало установленного норматива допустимого содержания 1,0 мг/кг сырой массы. Содержание Pb в печени в среднем в 2,4 раза превышало таковое в мышцах. Признаков антропогенного загрязнения исследованных рыб Pb не обнаружено. Предложены расчётные фоновые уровни содержания Pb в мышцах промысловых рыб Баренцева моря. Фоновые уровни отражают современное естественное содержание Pb в ихтиофауне региона и могут быть использованы для выявления антропогенного воздействия на биоту. Статистически обосновано предположение о связи уровня содержания Pb с таксономическим положением объекта: в Камбаловых рыбах его содержание в мышцах достоверно ниже, чем в Тресковых.

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

Ключевые слова: металлы, треска, пикша, палтус, мышцы, печень.

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

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

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

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

The aim: to study the amount of lead 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 «PINRO» named after Knipovich in the Barents Sea in 2009-2022. 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 large amount of material was used to perform a comparative analysis of Pb content in six commercial fish species of the Barents Sea. Natural background levels of its content to be regarded as acceptable were identified.

Methods used: lead in samples was detected by flame atomic absorption spectrophotometry using Shimadzu (Japan) spectrophotometer. Processing of statistical data and diagram plotting were performed in MS Excel and Statistica 13 application package.

Results: It has been shown that mean Pb content in fish muscle and liver did not exceed the standard for permissible content, 1.0 mg/kg of the wet weight. Pb content in liver was found to exceed that in muscle by 2.4 times on the average. No signs of anthropogenic pollution by Pb was found in the studied samples. Estimates of background Pb levels in muscle of the Barents Sea commercial fishes were suggested. The background levels are markers of the current natural Pb content in the regional fish fauna and can be used to reveal anthropogenic impact on the biota. There is a statistically sound suggestion regarding a probable link between Pb content and fish taxonomy: the content of Pb in muscle of flatfish is reliably lower than in gadoid fishes.

Practical significance: the obtained results were used to estimate the compliance with safety standards for commercial fishes established by the technical regulations of the Customs Union accepted in Russia.

Keywords: metals, cod, haddock, Greenland halibut, muscle, liver.

ВВЕДЕНИЕ

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

Естественными источниками поступления свинца в поверхностные воды являются процессы растворения эндогенных (галенит PbS) и экзогенных минералов (англезит $PbSO_4$, церуссит $PbCO_3$ и др.). Содержащая Pb силикатная пыль природных почв, вулканические галогенные аэрозоли и силикатные дымы, попадая в атмосферу, возвращаются на землю с атмосферными осадками [Руководство по химическому..., 1977].

Техногенное загрязнение природных вод и воздуха Pb происходит в результате процесса обжига и плавки свинцовых руд в целях получения металлического свинца [Израэль, Цыбань, 2009]. Значительное повышение концентрации Pb в окружающей среде, в том числе и в природных водах, является следствием широкого применения его в промышленности, сжигания углей, древесины и других органических материалов, включая городские отходы. Важнейшим источником поступления Pb в окружающую среду является автомобильный транспорт; почти в 10 раз ниже вклад сжигания топлива в цветной металлургии. В этилированном бензине содержится органическое соединение Pb (триэтилсвинец), которое более токсично для живых организмов, чем неорганический Pb [Диагностический анализ..., 2011; Clark, 2011; Kumar et al., 2020].

Соединения Pb выносятся в водоёмы со сточными водами рудообогатительных фабрик, некоторых металлургических предприятий, химических производств и шахт [Руководство по химическому..., 1977; Израэль, Цыбань, 2009]. Освоение нефтегазовых месторождений также способно сильно загрязнять свинцом почву и приповерхностную гидросферу.

Свинец относится к так называемым неэссенциальным элементам, представляющим наибольшую экологическую опасность. Эти элементы способны накапливаться в организме животных и включаться в метаболические процессы, оказывая токсическое воздействие [Моисеенко, 2015; Abel, 1996; Campbell, 1995]. Токсичность Pb несколько ниже, чем Hg , Cd и Cu , однако она достаточно велика [Мур, Рамамурти, 1987; Bjerregaard et al., 2014]. Токсический эффект Pb на рыб характеризуется потемнением хвостового стебля (симптом нейротоксикоза), искривлением тела, дегенерацией плавников, гиперактивностью и потерей равновесия. Параллельно с этим обнару-

живаются очаговый некроз паренхимы печени, почек и селезёнки, дистрофия мышечных пучков миокарда, резорбция половых клеток, гемосидероз в селезёнке и почках [Васильков и др., 1989; Kim, Kang, 2015]. Накопление Pb в мышцах рыб обычно ниже, чем в органах, что обусловлено более высоким содержанием в органах (печень, почки и др.) специфических белков – металлотионеинов, связывающих металлы. Низкая растворимость солей Pb ограничивает его движение через клеточные мембраны. Тем не менее, Pb также относят к тиоловым ядам, т. к. он необратимо инактивирует ферменты и нарушает функции структурных белков [Филенко, Михеева, 2007].

Ряд научных исследований подтверждают, что рыба (*in situ*) является хорошим индикатором состояния водной среды, биологической доступности микроэлементов и нарушений метаболизма гидробионтов, связанных с их избытком [Гашкина и др., 2022; Whitfield, Elliott, 2002; Yeom, Adams, 2007].

Допустимый уровень содержания Pb в мышцах (филе, фарш) и печени промысловых видов рыб, предназначенных для пищевых целей, согласно требованиям Технического регламента Таможенного союза (ТР ТС 021/2011)¹ составляет 1,0 мг/кг (мкг/г).

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

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материал для исследований собирался в рамках комплексных научных экспедиций, главным образом, на судах «ПИНРО» им. Н.М. Книповича «Смоленск», «Вильнюс» и «Фритюф Нансен» в ходе 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 ($n = 415$), пикши *Melanogrammus aeglefinus* (L., 1758) ($n = 275$), камбалы-ерша *Hippoglossoides platessoides* Gottsche, 1835 ($n = 227$), чёрного или синекорого палтуса *Reinhardtius hippoglossoides* (Walbaum, 1792) ($n = 171$), морской камбалы *Pleuronectes platessa* L., 1758 ($n = 105$) и зубатки пёстрой или пятнистой *Anarhichas minor* Ólafsson, 1772 ($n = 57$), пойманных в результате учётных тралений в период с 2009 по 2022 гг. включительно практически на всей акватории Баренцева моря. Для примера на рис. 1 приведена схема отбора проб

¹ Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС - 021 - 2011). <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/standarts/technicalregulationses>

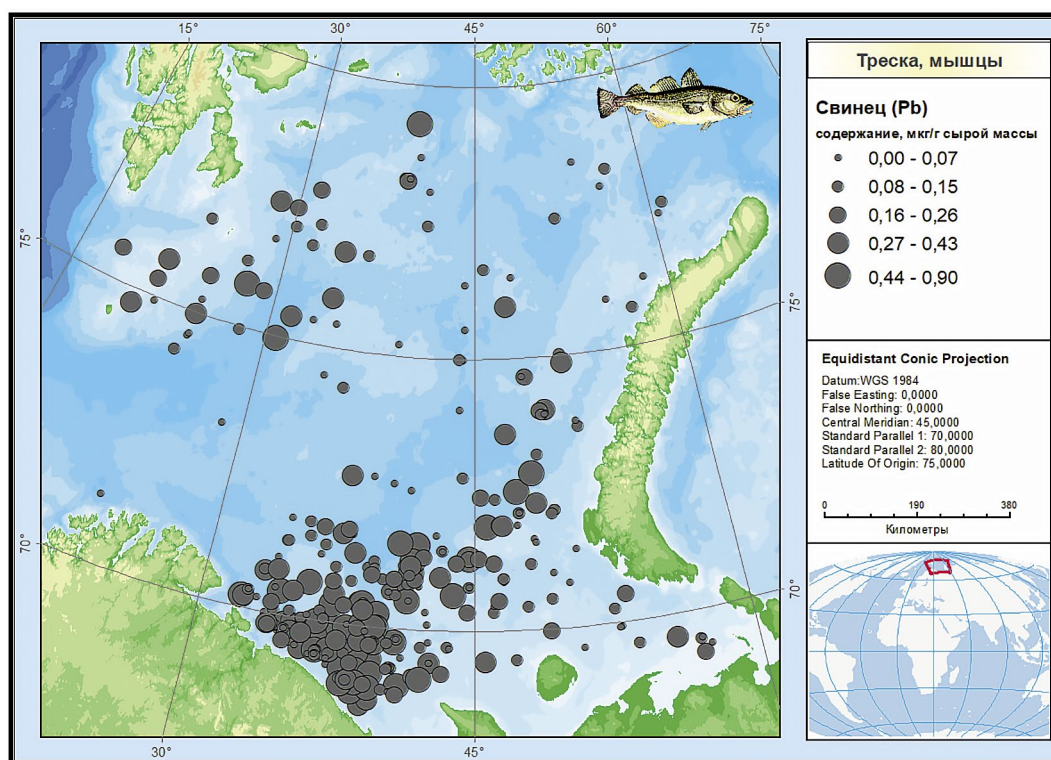


Рис. 1. Карта-схема отбора проб и содержание свинца в мышцах трески Баренцева моря

Fig. 1. Map of sampling and lead content in cod muscle in the Barents Sea, mg/kg wet weight

атлантической трески. Есть одно исключение: в 2009 г. пробы чёрного палтуса не отбирали. Всего для отбора материала было выполнено более 500 траловых станций. Исследование содержания Pb в печени выполнялось для тех же рыб, но на несколько меньшем количестве экземпляров. Во всех случаях одна проба соответствовала одному экземпляру рыбы.

Отбор проб рыб и их хранение осуществляли в соответствии с методическими указаниями ВНИРО [Изучение экосистем..., 2004]. По завершению отбора пробы были помещены в специальные пакеты и заморожены при -20°C для доставки в стационарную лабораторию.

Подготовка и химический анализ проб рыбы выполнены в «ПИНРО» им. Н.М. Книповича на основе известной методики². Подготовка проб проводили методом «мокрой» минерализации. Предварительно образцы тканей рыб тщательно измельчали до пастообразного состояния. К навеске мышц или печени рыб добавляли смесь 70% особо чистой HNO_3 и концентрированной H_2O_2 (4:1), выдерживали в течение 24 ч при комнатной температуре, затем помещали в ми-

кроволновую систему пробоподготовки МС-6 (НТФ «Вольта», г. Санкт-Петербург, Россия). Свинец в пробах гидробионтов определяли методом пламенной спектрофотометрии на атомно-абсорбционном спектрофотометре фирмы «Shimadzu», модель AA 6800 (Япония). Условия проведения измерений на приборе следующие: длина волны 217 нм, ширина щели 0,5/0,7 нм, система коррекции фона D2. Тип пламени воздух/ацетилен. Для градуировки использовали Государственные стандартные образцы (ГСО) состава водных растворов ионов Pb. Каждая аналитическая серия включала «холостую» пробу, что позволяло контролировать возможное загрязнение образцов в процессе анализа. Содержание Pb 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 свинца в мышцах исследованных рыб, представлены в табл. 1 и на рис. 1, 2. Среднее содержание Pb в мышцах основных промысловых видов Баренцева моря было значительно ниже допустимого уровня 1,0 мг/кг сырой массы.

Приведённые в табл. 1 максимальные измеренные значения, а также уровни фонового содержания

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

Таблица 1. Содержание свинца в мышцах промысловых рыб Баренцева моря
Table 1. Total lead 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 |
|----------------------|----------------------------|---|------------------------|--------------------------------|
| Атлантическая треска | < 0,001-0,90 | $0,195 \pm 0,009$ 0,13 | 0,18 | 0,6 |
| Пикша | < 0,001-0,92 | $0,216 \pm 0,013$ 0,12 | 0,21 | 0,6 |
| Камбала-ёрш | < 0,001-0,82 | $0,156 \pm 0,009$ 0,11 | 0,14 | 0,5 |
| Палтус чёрный | 0,005-0,83 | $0,165 \pm 0,012$ 0,11 | 0,15 | 0,5 |
| Камбала морская | < 0,001-0,84 | $0,185 \pm 0,02$ 0,12 | 0,20 | 0,40 |
| Пёстрая зубатка | < 0,001-0,83 | $0,183 \pm 0,027$ 0,10 | 0,20 | 0,6 |

Примечание: m – стандартная ошибка среднего арифметического; < 0,001 – значения ниже предела обнаружения применяемого метода анализа.

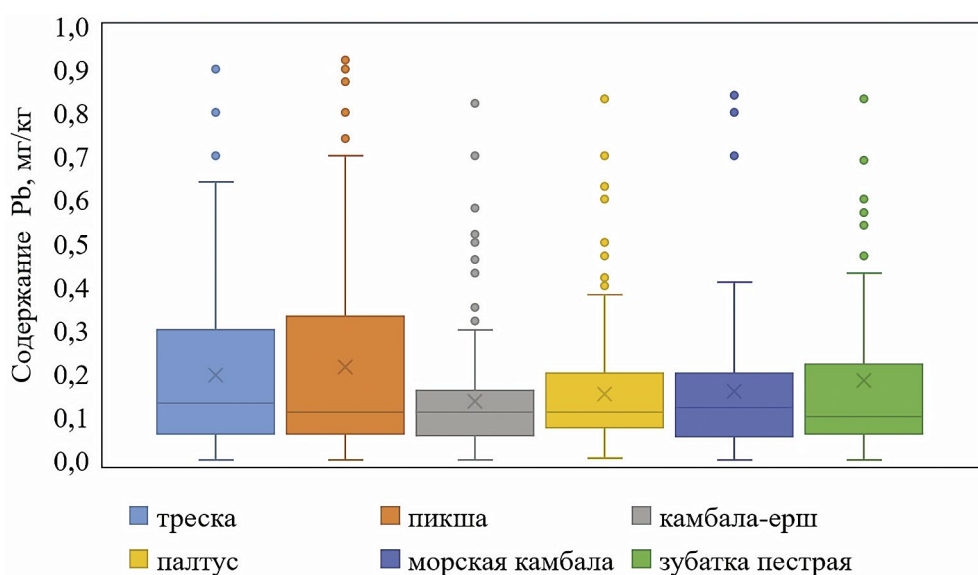


Рис. 2. Диаграмма содержания свинца в мышцах промысловых рыб Баренцева моря, мг/кг сырой массы
Fig. 2. Whisker box plot of lead content in muscle of commercial fish of the Barents Sea, mg/kg wet weight

Pb в мышцах исследованных донных рыб Баренцева моря также были ниже норматива. Величины фоновых уровней рассчитаны нами на основе подхода, предложенного ранее [Новиков и др., 2021, 2023]. В общем случае, превышение фонового уровня содержания Pb в рыбе может служить признаком антропогенного загрязнения даже тогда, когда превышение норматива не наблюдается.

Характер распределения величин содержания Pb в мышцах всех исследованных рыб отличался от нормального на основании критерия Колмогорова-Смирнова (во всех случаях $p < 0,01$).

Статистическая обработка представленных данных показала, что имеют место значимые различия в содержании Pb в мышцах исследованных нами рыб согласно однофакторному критерию Краскела-Уоллиса ($p = 0,03$). Для того, чтобы понять какие именно виды различаются по содержанию Pb в мышцах, были выполнены попарные сравнения с помощью U-критерия Манна-Уитни. Содержание Pb в мышцах трески и пикши достоверно превышало такое в мышцах камбалы-ерша ($p = 0,003$; $p = 0,007$). В остальных парах различия в содержании Pb в мышцах рыб оказались статистически не значимы. Таким

образом, видоспецифичность в накоплении рыбами Pb выражена достаточно слабо. Вместе с тем, на уровень содержания Pb в мышцах оказывало влияние таксономическое положение объекта (рис. 3). Так, у Тресковых рыб (сем. Gadidae: пикша и треска) по сравнению Камбаловыми (сем. Pleuronectidae: камбала-ёрш, морская камбала и чёрный палтус), содержание Pb в мышцах было статистически значимо выше (U-критерий Манна-Уитни: $p = 0,002$). Причём, различия остаются значимыми и при исключении из выборки данных по содержанию Pb в мышцах камбалы-ёрша ($p = 0,045$).

Известно, что уровень содержания ТМ в мышцах рыб в некоторых случаях коррелирует с содержанием жира (липидов) в них [Морозов, Петухов, 1986]. Треска и пикша характеризуются более низким содержанием жира в мышцах (в среднем 0,3 и 0,2 % соответственно), чем морская камбала, камбала-ёрш, чёрный палтус (3,3, 3,2 и 16 %) [Константинова и др., 1997]. Выявленные различия в накоплении Pb в мышцах рыб из сем. Тресковых и Камбаловых могли быть связаны с разным содержанием жира. Однако, проведённый нами корреляционный анализ по Спирмену не выявил связи между содержанием жира в мышцах изученных рыб и содержанием в них Pb ($r_s = 0,03$).

Исследованные нами виды рыб на основе данных по характеру питания можно разделить на хищных – треска и чёрный палтус, хищно-бентоядных –

камбала-ёрш, бентофагов – пикша, морская камбала и пёстрая зубатка [Долгов, 2016]. Сравнение – содержания Pb в мышцах исследованных хищных рыб и бентофагов не выявило статистически значимых различий между указанными группами (U-критерий Манна-Уитни: $p = 0,85$). Таким образом, содержание Pb, в мышцах исследованных рыб, вероятно, не зависит от их трофического статуса. Аналогичные результаты ранее были получены нами для ртути [Новиков и др., 2023].

Анализ межгодовой динамики показателей содержания Pb в мышцах исследованных рыб не выявил достоверных трендов.

Согласно известным данным, корреляция между содержанием Pb и возрастом (и размером) рыб, как правило, отсутствует [Филенко, Михеева, 2007]. Наши исследования это подтверждают: зависимость содержания Pb от веса трески и пикши не обнаружена. Из рис. 4 видно, что содержание свинца в мышцах никак не коррелирует с весом трески ($n = 137$, размер выборки связан с числом промеренных рыб). Анализируя представленные на рис. 4 данные можно отметить, что большая вариабельность содержания Pb в мышцах трески наблюдается у рыб практически всех размеров (возрастов), за исключением особей примерно до 2,5 кг. У этих сравнительно молодых рыб содержание Pb в мышцах изменяется в ограниченных пределах. Аналогичная картина наблюдается у пикши

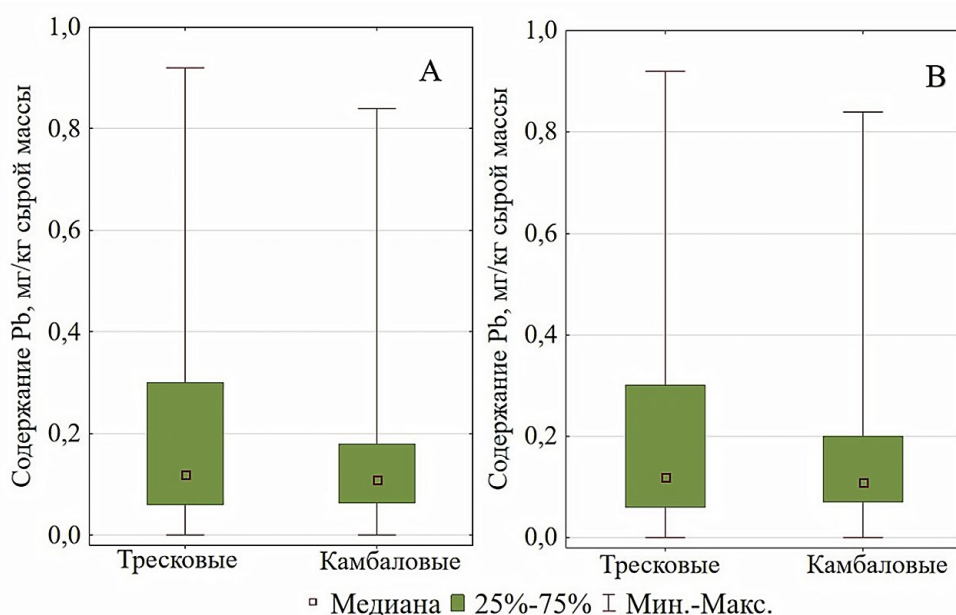


Рис. 3. Содержание Pb в мышцах рыб сем. Тресковых и Камбаловых: А – камбала-ёрш включена в выборку (сем. Камбаловых); В – камбала-ёрш исключена из выборки

Fig. 3. Lead content in the muscle of fish of the Gadidae and Pleuronectidae families: А – long rough dab is included in the sample (Pleuronectidae family); В – long rough dab is excluded from the sample

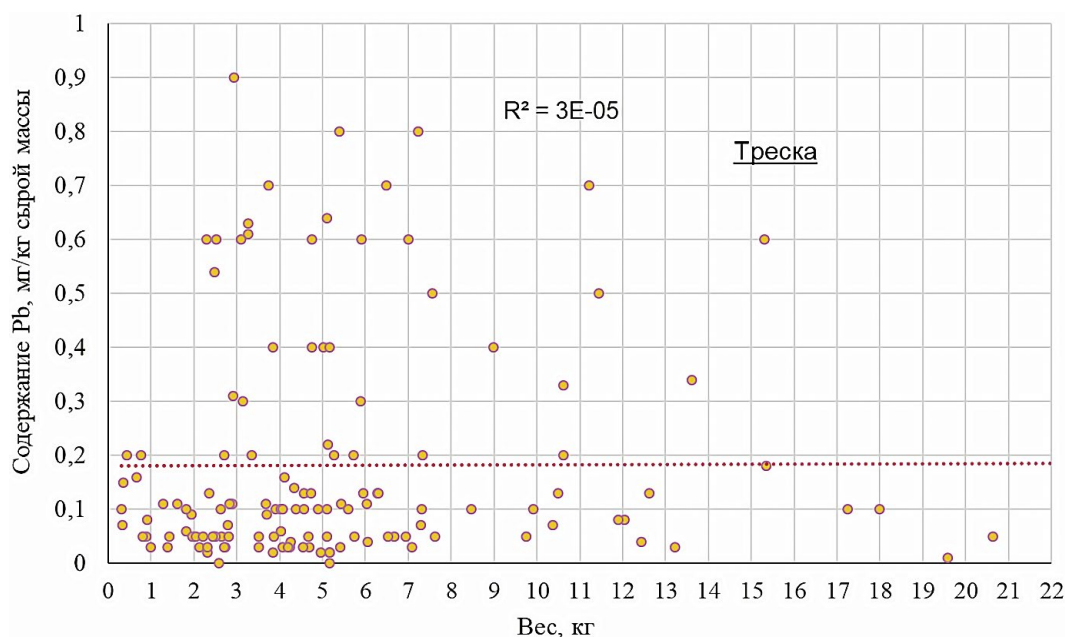


Рис. 4. Связь содержания свинца в мышцах трески Баренцева моря с весом рыбы с указанием линии тренда и коэффициента детерминации

Fig. 4. The relationship of lead content in the muscle of the Barents Sea cod with the weight of the fish, indicating the trend line and coefficient of determination

($n = 118$, $R^2 = 0,036$), с наибольшей вариабельностью содержания Pb у рыб весом от 0,6 до 2,3 кг.

Содержание Pb в печени исследованных промысловых рыб было в среднем в 2,4 раза выше, чем в мышцах (табл. 2, рис. 5). Максимальное содержание Pb в печени рыб Баренцева моря в некоторых случаях превышало предельно допустимый уровень, установленный ТР ТС 021/2011 – 1,0 мг/кг сырой массы. Так, превышение норматива содержания Pb в печени

наблюдалось у 2,1% (пёстрая зубатка) и 3,8% (чёрный палтус) исследованных экземпляров.

Величина превышения содержания Pb в печени над таковым в мышцах у исследованных донных рыб была больше ранее отмеченного нами аналогичного превышения для Hg и As (≈ 2 раза), но заметно ниже такового показателя, рассчитанного нами для других ТМ, где максимальным было накопление в печени Cu и Cd [Новиков и др., 2021, 2023, 2024].

Таблица 2. Содержание свинца в печени промысловых рыб Баренцева моря

Table 2. Total lead content in the liver of commercial fish of the Barents Sea

| Вид рыбы | Диапазон содержания, мг/кг | Среднее содержание \pm т / медиана, мг/кг сырой массы | Стандартное отклонение | Превышение над средним содержанием в мышцах, разы |
|----------------------|----------------------------|---|------------------------|---|
| Атлантическая треска | < 0,001-1,44 | $0,431 \pm 0,014$ 0,40 | 0,27 | 2,2 |
| Пикша | < 0,001-1,10 | $0,430 \pm 0,017$ 0,40 | 0,28 | 2,0 |
| Камбала-ёрш | < 0,001-2,40 | $0,376 \pm 0,027$ 0,30 | 0,35 | 2,4 |
| Палтус чёрный | < 0,001-1,20 | $0,439 \pm 0,031$ 0,39 | 0,29 | 2,7 |
| Камбала морская | < 0,001-0,98 | $0,459 \pm 0,03$ 0,42 | 0,27 | 2,5 |
| Пёстрая зубатка | < 0,001-1,03 | $0,473 \pm 0,037$ 0,45 | 0,28 | 2,6 |

Примечание: т – стандартная ошибка среднего; < 0,001 – значения ниже предела обнаружения применяемого метода анализа.

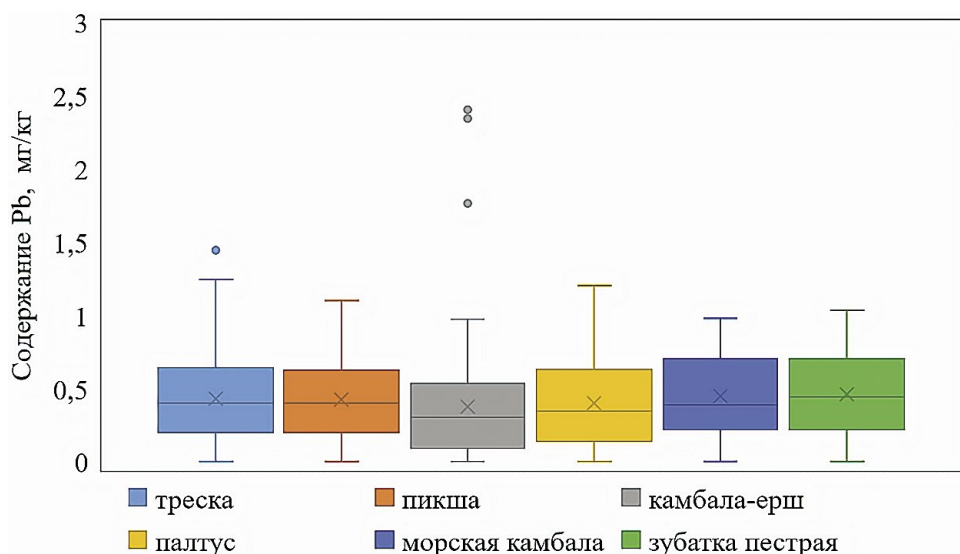


Рис. 5. Диаграмма содержания Pb в печени промысловых рыб Баренцева моря, мг/кг сырой массы

Fig. 5. Whisker box plot of lead content in liver of commercial fish of the Barents Sea, mg/kg wet weight

Статистический анализ полученных данных показал, что распределение величин накопления Pb в печени трески, пикши и камбалы-ерша отличалось от нормального на основании критерия Колмогорова-Смирнова. Нормальным было распределение Pb в печени чёрного палтуса, морской камбалы и пёстрой зубатки (во всех случаях $p > 0,20$).

Статистическая обработка также показала, что имеют место значимые различия в содержании Pb в печени исследованных нами рыб согласно однофакторному непараметрическому критерию Краскела-Уоллиса ($p=0,009$). На основании парного критерия Манна-Уитни было установлено, что содержание Pb в печени камбалы-ерша достоверно ниже его содержания в печени трески ($p=0,000$), пикши ($p=0,005$), морской камбалы ($p=0,004$) и пёстрой зубатки ($p=0,009$).

Различия в содержании Pb в печени исследованных нами представителей семейств Тресковых и Камбаловых рыб были статистически не значимы (U -критерий Манна-Уитни: $p=0,65$). Связь между жирностью печени изученных рыб и содержанием в ней Pb очень слабая ($r_s = 0,12$). Содержание Pb в печени рыб также не зависело от их трофического статуса (U -критерий Манна-Уитни: $p=0,81$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа, представленные группой немецких учёных, в мышцах атлантической трески, отобранной на станциях в Норвежском и Баренцевом морях и в районе Гренландии (съёмки 2006-2010 гг.), показывают весьма низкие значения содержания Pb:

от 0,0030 до 0,0068 мг/кг сырой массы ($n=25$) [Karl et al., 2016]. Содержание Pb в печени трески эти авторы не исследовали.

Ранее также показано, что содержание Pb в мышцах и печени морских рыб из района Гренландии редко превышает 0,017 мг/кг сырой массы. Среднее геометрическое значение содержания Pb в мойве *Mallotus villosus* (Müller, 1776) (тушка) из района Гренландии составляло 0,147 мг/кг сырой массы, пятнистой зубатки в печени – 0,013 мг/кг; у чёрного палтуса в мышцах – < 0,010 мг/кг сырой массы, у европейского керчака *Myoxocephalus scorpius* (L., 1758) в мышцах – < 0,010, в печени – 0,011 мг/кг сырой массы [Dietz et al., 1996]. По сравнению с нашими данными, это весьма низкие значения. По другим данным [Ervik et al., 2018], среднее содержание Pb в мышцах атлантической трески и белокорого палтуса *Hippoglossus hippoglossus* (L., 1758) из прибрежной зоны Норвегии (Норвежское море) также было очень низким и составляло 0,002-0,015 мг/кг и 0,002 мг/кг сырой массы соответственно.

Как показали проведённые нами исследования, содержание Pb в атлантической треске Баренцева моря оказалось значительно выше, чем в представителях этого вида из морей, омывающих берега Западной Европы. Так, в мышцах атлантической трески из пролива Ла-Манш среднее содержание Pb составляло 0,043 мг/кг сырой массы [Mauffret et al., 2023] и было в несколько раз ниже, чем в треске Баренцева моря. В мышцах атлантической трески из юго-восточной части Балтийского моря содержание свинца составляло 0,032 мг/кг сырой массы [Родюк и др., 2012]. Соглас-

но данным норвежских исследователей, содержание Pb в треске из западной части Баренцева моря также было достаточно низким, с диапазоном: < 0,01–0,04 мг/кг в мышцах и < 0,01–0,06 мг/кг сырой массы в печени [Julshamn et al., 2013].

В мышцах морской камбалы (*P. platessa*) из пролива Ла-Манш (Атлантика) среднее содержание Pb также очень низкое – 0,008 мг/кг [Mauffret et al., 2023].

В то же время, содержание Pb в мышцах и печени горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* (Walbaum, 1792), зашедшей на нерест в реки бассейна Баренцева моря в 2019 г. мало отличалось друг от друга и составляло 0,208 и 0,286 мг/кг сырой массы соответственно [Христофорова и др., 2023], что вполне согласуется с представленными нами результатами. Известно, что горбуша, большую часть своей жизни проводит в море, в реке практически не питается, поэтому источники загрязнения ее тканей и органов ТМ следует связывать с морской средой обитания в Баренцевом, Северном и Норвежском морях [Шунтов, Тёмных, 2018].

Современный норматив содержания Pb в мышцах промысловых рыб, принятый в Евросоюзе, составляет 0,3 мг/кг сырой массы [E.U., 2011³], что более чем в три раза ниже отечественного норматива.

Для сравнения можно также привести некоторые данные по сем. Камбаловых (Pleuronectidae) из других регионов. Так, среднее содержание Pb в мышцах малоротой *Microstomus stelleri* (Schmidt, 1904) и желтопёрой *Limanda (Pleuronectes) aspera* (Pallas, 1814) камбал из залива Петра Великого (Японское море) варьировало от 0,03 до 0,07 мг/кг [Ковековдова и др., 2016], что в разы ниже такового в морской камбале и камбале-ерше из Баренцева моря (см. табл. 1). У остроголовой камбалы *Cleisthenes pinetorum* Jordan & Starks, 1904 из Охотского моря содержание Pb в мышцах также было низким и составило 0,08 мг/кг, а у сахалинской камбалы *Limanda sakhalinensis* Hubbs, 1915 из Японского моря 0,07 мг/кг сырой массы [Ковековдова и др., 2015].

По опубликованным данным, содержание Pb в печени и почках рыб заметно выше, чем в мышцах [Ершова и др., 2021; Moiseenko, Gashkina, 2020]. Это не противоречит результатам наших исследований и может быть обусловлено более высоким содержанием в этих органах специфических белков – металлопротеинов, способных связывать металлы и защищать клетку от токсического действия [Моисеенко, 2015]. При относительно невысоких концентрациях метал-

лов их детоксикация может происходить также в печени и почках за счет связывания уже имеющимися в белках сульфгидрильными группами (RS-H) [Hodson, 1988].

Отмеченное нами нормальное распределение содержания Pb в печени чёрного палтуса, морской камбалы и пёстрой зубатки из Баренцева моря свидетельствует в пользу того, что оно носит, с точки зрения статистики, «случайный» характер. Аналогичная ситуация была отмечена нами ранее в отношении содержания ртути в мышцах и печени баренцевоморских рыб [Новиков и др., 2023]. Полагают, что рыбы способны выводить Pb из организма с участием печени, иными словами, регулировать его накопление [Heath, 2002; Hodson, 1988]. Выведение химических веществ из организма рыб, в целом, происходит через жабры, почки и кожу, а вместе с желчью и через пищеварительный тракт [Моисеенко, 2015].

Для сравнения с нашими данными, среднее содержание Pb в печени остроголовой камбалы из Охотского моря составило 0,17 мг/кг сырой массы, соответственно [Ковековдова и др., 2015], что несколько ниже результатов наших измерений, приведенных в табл. 2. В печени рыб из Чёрного моря содержание Pb было весьма близким к полученным нами значениям. Так, у морского ерша *Scorpaena porcus* L., 1758 и мерланга *Merlangius merlangus euxinus* (L., 1758) содержание Pb в среднем составляло 0,46 и 0,66 мг/кг сырой массы соответственно [Дорохова и др., 2012].

У озёрного сига *Coregonus lavaretus* (L., 1758) даже в относительно загрязнённом водоёме, таком как Имандра (Кольский п-ов) в печени отмечено наименьшее количество Pb (0,04–0,05 мкг/г сухого веса), заметно больше Pb наблюдалось в почках; жабры содержали свинец в количестве почти на порядок превышающем таковое в почках [Гашкина и др., 2022]. При исследовании пресноводных рыб из рек и озёр Европейской части России эти же авторы отмечали, что видоспецифичность в накоплении Pb рыбами не прослеживается [Moiseenko, Gashkina, 2020].

Изученные виды рыб Баренцева моря мало различались между собой по содержанию Pb как в мышцах, так и печени. Вместе с тем содержание Pb в мышцах рыб сем. Камбаловых по сравнению с сем. Тресковых оказалось незначительно, но достоверно ниже. Наиболее заметно по уровню содержания Pb в мышцах и печени от трески и пикши отличалась камбала-ёрш.

Пониженное содержание Pb в мышцах Камбаловых рыб по сравнению с Тресковыми может быть следствием адаптации к обитанию в среде с более

³ E.U. 2011. Commission Regulation (EU) No 420/2011 of 29 April 2011 amending Regulation (EC) No 1831/2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. Off. J. Eur. Union 49 (L111). P. 3–6. <https://www.legislation.gov.uk/eur/2011/420>

высоким содержанием этого металла. Жизнь Камбаловых рыб тесно связана с донными осадками. Известно, что ТМ и другие загрязняющие вещества, поступающие в водоёмы, аккумулируются в донных отложениях. Возможно, в процессе эволюции в организме Камбаловых рыб сформировались механизмы, способствующие более активному выведению Pb, поступающего через жабры и с пищей. Не исключено, что более низкое содержание Pb в мышцах Камбаловых рыб может быть результатом перераспределением металла в другие органы. По опубликованным данным Pb в мышцах рыб содержится в меньших количествах, чем в органах. Исследование рыб из Каспийского моря показало, что наиболее высокое содержание Pb наблюдалось в жабрах и почках [Ершова и др., 2021]. Накопление Pb в жабрах, по мнению авторов приведенной публикации, обусловлено респираторной и барьерной функцией этого органа. Показано, что в организме пресноводных рыб Pb в наибольших количествах также аккумулируется в почках [Моисеенко, 2015; Moiseenko, Gashkina, 2020]. У лососевых Pb и Cd длительное время сохраняются в почках и после окончания воздействия (экспозиции) [Phillips, Rainbow, 1989].

Сказанное выше говорит о том, что уровень содержания Pb в мышцах и печени рыб трудно поддается объяснению и прогнозированию и, вероятно, в значительной мере определяется региональными особенностями. Можно предположить, что накопление Pb будет меньше у рыб из районов, традиционно связанных с поступлением антропогенного загрязнения вследствие адаптации гидробионтов, например, выработки гомеостатического контроля содержания ТМ [Моисеенко, 2015; Гашкина и др., 2022].

Воздействие Pb на рыб вызывает множество токсических эффектов, влияет на физиологические и биохимические функции. Накопление Pb в организме рыб вызывает окислительный стресс, изменения в иммунных реакциях, негативно воздействует на центральную и периферическую нервную систему, кроветворение и др. Токсичность Pb в сочетании с возможностью заменять такие двухвалентные катионы к Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , а также одновалентный катион Na^{+} приводит к нарушению метаболизма клетки. При этом происходят значительные изменения в различных биологических процессах таких как клеточная адгезия, внутри- и межклеточная сигнализация, сворачивание белков, созревание, апоптоз, ионный транспорт, регуляция ферментов и высвобождение нейротрансмиттеров [Garcia-Leston et al., 2010; Mager, 2012; Jaishankar et al., 2014; Lee et al., 2019; Moiseenko, Gashkina, 2020].

Содержание Pb в мышцах и печени исследованных нами рыб не зависело от их трофического статуса. В то же время, анализ результатов ряда исследований, указывает на возможность накопления Pb в морских пищевых цепях при переходе от низких к более высоким трофическим уровням, за исключением высших хищников. Особенно заметна биомагнификация Pb при переходе от первичных продуцентов к консументам первого порядка [Sun et al., 2020]. У позвоночных животных Pb в основном хранится в костях, что снижает риск его передачи другим организмам пищевой цепи [Bjerregaard et al., 2014; Karl et al., 2016].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований показано, что для промысловых рыб Баренцева моря характерно относительно высокое содержание Pb в мышцах и печени. Однако, случаи превышения норматива содержания Pb (1,0 мг/кг) в печени трески, камбалы-ерша, чёрного палтуса и пёстрой зубатки были единичны. Признаки антропогенного загрязнения исследованных промысловых рыб свинцом не обнаружены.

Предложены расчётные фоновые уровни содержания свинца в мышцах промысловых рыб Баренцева моря. Фоновые уровни отражают современное естественное содержание Pb в ихтиофауне региона и могут быть использованы для выявления антропогенного воздействия на экосистему.

Содержание Pb в печени исследованных рыб в среднем в 2,4 раза превышало её содержание в мышцах. Связь уровня накопления Pb с уровнем содержания жира в мышцах и печени исследованных рыб не выявлена.

Отмечено, что содержание Pb в мышцах и печени камбалы-ерша было достоверно ниже, чем у остальных исследованных рыб. Максимальный уровень накопления Pb в печени наблюдался у чёрного палтуса – в 2,7 раза выше, чем в мышцах. Однако, в целом, видоспецифичность способности к накоплению Pb в промысловых рыбах Баренцева моря не выявлена. В то же время, статистически обосновано предположение о вероятной связи уровня содержания Pb с таксономическим положением объекта: в Камбаловых рыбах его содержание в мышцах достоверно ниже, чем в Тресковых.

Уровень содержания Pb в мышцах и печени рыб трудно поддается объяснению и прогнозированию (исключая случаи очевидного антропогенного загрязнения). Вероятно, в значительной мере, его следует связывать с региональной спецификой – условиями существования и эволюцией ихтиофауны в отдельных водоёмах (регионах).

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 свинца.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» на базе Полярного филиала («ПИНРО» им. Н.М. Книповича).

ЛИТЕРАТУРА

- Васильков Г.В., Грищенко Л.И., Енгашев В.Г. 1989. Болезни рыб. Справочник / В.С. Осетров ред. М.: Агропромиздат. 288 с.
- 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. / Б.А. Моргунов ред. М.: Научный мир. 1260 с.
- Долгов А.В. 2016. Состав, формирование и трофическая структура ихтиоценозов Баренцева моря. Мурманск: ПИНРО. 336 с.
- Дорохова И.И., Кузьминова Н.С., Руднева И.И., Болдырев Д.А. 2012. Содержание тяжёлых металлов и биоиндикаторы состояния печени некоторых видов черноморских рыб // Ветеринарная медицина. Вып. 96. С. 288-290.
- Ершова Т.С., Зайцев В.Ф., Чаплыгин В.А. 2021. Особенности миграции свинца в экосистеме Каспийского моря // Учёные записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. Биология. Химия. Т. 7 (73), № 4. С. 3-22.
- Израэль Ю.А., Цыбань А.В. 2009. Антропогенная экология океана. М.: Флинта. 532 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. 2015. Мониторинг содержания металлов и мышьяка в промысловых рыбах и морской воде дальневосточных морей // Рыбное хозяйство. № 2. С. 18-24.
- 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. Всеросс. научн.-практ. конф. с межд. участием, приуроченной к 145-летию Севастопольской биологической станции. Севастополь: Изд-во ЭКОСИ-Гидрофизика. Т. 3. С. 111-114.
- Константинова Л.Л., Двинин Ю.Ф., Лебская Т.К., Кузьмина В.И. 1997. Технохимические свойства промысловых рыб Северной Атлантики и прилегающих морей Северного Ледовитого океана. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 183 с.
- Моисеенко Т.И. 2015. Влияние геохимических факторов водной среды на биоаккумуляцию металлов в организме рыб // Геохимия. № 3. С. 222-233.
- Морозов Н.П., Петухов С.А. 1986. Микроэлементы в промысловой ихтиофауне Мирового океана. М.: Агропромиздат. 160 с.
- Мур Дж. В., Рамамурти С. 1987. Тяжелые металлы в природных водах. Контроль и оценка влияния. М.: Мир. 288 с. (Moore J., Ramamoorthy S. 1984. Heavy metals in natural waters. Applied Monitoring and Impact Assessment. Springer-Verlag, New York-Berlin-Heidelberg-Tokyo.)
- 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., Горбачева Е.А., Харламова М.Н. 2024. Содержание кадмия в промысловых рыбах Баренцева моря (по многолетним данным) // Труды ВНИРО. Т. 198. С. 87-99. DOI: 10.36038/2307-3497-2024-198-87-99
- Родюк Г.Н., Чукалова Н.Н., Шендерюк В.В., Бахолдина Л.П., Чернышева Н.Л., Саядов С.О. 2012. Встречаемость язвенного поражения кожи у трески (*Gadus morhua callarias* L.) в условиях антропогенного загрязнения юго-восточной части Балтийского моря // Биология внутренних вод. № 1. С. 100-106.
- Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши 1977. / А.Д. Семенов ред. Л.: Гидрометеиздат. 541 с.
- 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.
- Христофорова Н.К., Литвиненко А.В., Алексеев М.Ю., Цыганков В.Ю. 2023. Микроэлементный состав горбуши из рек баренцевоморского и охотоморского бассейнов // Российский журнал биологических инвазий. № 2. С. 272-287. DOI: 10.35885/1996-1499-16-2-272-287

- Шунтов В.П., Тёмных О.С. 2008. Тихоокеанские лососи в морских и океанических экосистемах. Владивосток: ТИПРО-центр. Т. 1. 482 с.
- Abel P.D. 1996. Water pollution biology. London: Taylor & Francis Ltd. 296 p. DOI: 10.1201/9781482295368
- Bjerregaard P., Andersen C., Andersen O. 2014. Ecotoxicology of metals – sources, transport, and effects on the ecosystem // Handbook on the Toxicology of Metals / G.F. Nordberg, B.A. Fowler, M. Nordberg eds. Elsevier Science, Amsterdam. P. 425-459.
- Campbell P.G.C. 1995. Interactions between trace metals and aquatic organisms: a critique of the free-ion activity model // Metal Speciation and Bioavailability in Aquatic Systems / A. Tessier, D.R. Turner eds. Wiley. P. 45-102.
- Clark R.B. 2011. Marine pollution. Fifth edition. Oxford University Press. USA. 230 p.
- Dietz R., Riget F., Johansen P. 1996. Lead, cadmium, mercury and selenium in Greenland marine animals // The Science of the Total Environment. V. 186. P. 67-93.
- Heath A.G. 2002. Water Pollution and Fish Physiology. Lewis Publishers. 506 p.
- Hodson P.V. 1988. The effect of metabolism on uptake, disposition and toxicity in fish // Aquatic Toxicology. V. 11. P. 3-18.
- Ervik H., Erik T.F., Munro B.J. 2018. Toxic and Essential Elements in Seafood from Mausund, Norway // Environ. Sci. Pollut. V. 25(8). P. 7409-7417. DOI: 10.1007/s11356-017-1000-4
- Garcia-Leston J., Mendez J., Pasaro E., Laffon B. 2010. Genotoxic effects of lead: an updated review // Environ. Int. M. V. 36 (6). P. 623-636. DOI: 10.1016/j.envint.2010.04.011.
- Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B.B., Beeregowda K.N. 2014. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals // Interdiscip. Toxicol. V. 7(2). P. 60-72. DOI: 10.2478/intox-2014-0009
- Julshamn K., Duinker A., Nilsen B.M., Frantzen S., Maage A., Valdersnes S., Nedreaas K. 2013. A baseline study of levels of mercury, arsenic, cadmium and lead in Northeast Arctic cod (*Gadus morhua*) from different parts of the Barents Sea // Mar. Poll. Bull. V. 67. Iss. 1-2. P. 187-195. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2012.11.038
- 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 J.H., Kang J.C. 2015. The lead accumulation and hematological findings in juvenile rock fish *Sebastes schlegelii* exposed to the dietary lead (II) concentrations // Ecotoxicology and Environmental Safety. V. 115. P. 33-39. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2015.02.009
- Kumar A., Cabral-Pinto M.M.S., Chaturvedi A.K., Shabnam A.A., Subrahmanyam G., Mondal R., Gupta D.K., Malyan S.K., Kumar S.S., Khan A.S., Yadav K.K. 2020. Lead Toxicity: Health Hazards, Influence on Food Chain, and Sustainable Remediation Approaches // Int. J. Environ. Res. Public Health. V. 17(7):2179. DOI: 10.3390/ijerph17072179
- Lee J.W., Choi H., Hwang U.K., Kang J.C., Kang Y.J., Kim K.I., Kim J.H. 2019. Toxic effects of lead exposure on bioaccumulation, oxidative stress, neurotoxicity, and immune responses in fish: A review // Environ. Toxicol. Pharmacol. V. 68. P. 101-108. DOI: 10.1016/j.etap.2019.03.010
- Mager E.M. 2012. Lead. Homeostasis and Toxicology of Non-Essential Metals. Fish Physiology. V. 31A. / C.M. Wood, A.P. Farrell, C.J. Brauner eds. Amsterdam: Academic Press. P. 186-237.
- Mauffret A., Chouvelon T., Wessel N., Cresson P., Bănaru D., Baudrier J., Bustamante P., Chekri R., Jitaru P., Le Loc'h F., Mialet B., Vaccher V., Harmelin-Vivien M. 2023. Trace elements, dioxins and PCBs in different fish species and marine regions: Importance of the taxon and regional features // Environmental Research. V. 216, Part 3:114624. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114624
- Moiseenko T.I., Gashkina N.A. 2020. Distribution and Bioaccumulation of Heavy Metals (Hg, Cd and Pb) in Fish: Influence of the Aquatic Environment and Climate // Environ. Res. Lett. V. 15:115013. DOI: 10.1088/1748-9326/abbf7c
- Phillips D.J.H., Rainbow P.S. 1989. Strategies of trace metal sequestration in aquatic organisms // Marine Environment Research. V. 49. P. 83-93.
- Sun T., Wu H., Wang X., Ji C., Shan X., Li F. 2020. Evaluation on the biomagnification or biodilution of trace metals in global marine food webs by meta-analysis // Environ. Pollut. V. 264:113856. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113856
- Whitfield A.K., Elliott M. 2002. Fish as indicators of environmental and ecological changes within estuaries: a review of progress and some suggestions for the future // J. Fish Biol. V. 61. P. 229-250. DOI: 10.1006/jfbi.2002.2079
- Yeom D.-H., Adams S.M. 2007. Assessing effects of stress across levels of biological organization using an aquatic ecosystem health index // Ecotoxicol. Environ. Saf. V. 67 (2). P. 286-295. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2006.07.006

REFERENCES

- Vasil'kov G.V. Grishchenko L.I., Engashev V.G. 1989 Fish diseases. Handbook / V.S. Osetrov. ed. Moscow: Agropromizdat. 288 p. (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 / B.A. Morgunov ed. 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.).

- Dorohova I.I., Kuzminova N.S., Rudneva I.I., Boldyrev D.A. Contents of heavy metals and bioindicators of liver condition of some black sea fishes // Veterinarna medicina. Vyp. 96. P. 288-290. (In Russ.).
- Ershova T.S., Zaitsev V.F., Chaplygin V.A. 2021. Features of lead migration in the Caspian Sea ecosystem // Ucheny'e zapiski Kry'mskogo federal'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Biology. Chemistry. V. 7 (73), No. 4. P. 3-22. (In Russ.).
- Israel Yu.A., Tsyban A.V. Anthropogenic ecology of the ocean. 2009. Moscow: Flinta. 532 p. (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. M.: VNIRO Publish. 299 p. (In Russ.).
- Kovekovdova L.T., Kiku D.P., Kasyanenko I.S. 2015. Monitoring of metals and arsenic content in commercial fish and sea water of Far East // Rybnoe hozyaystvo. N 2. P. 18-24. (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. In 3 V. Proc. All-Russian scient.-prac. conf. with intern. participation to the 145th anniversary of the Sevastopol Biological Station. Sevastopol: ECOSI-Hydrophysics. V.3. P. 111-114. (In Russ.).
- Konstantinova L.L., Dvinin Yu.F., Lebskaya T.K., Kuz'mina V.I. 1997. Technochemical properties of commercial fish of the North Atlantic and adjacent seas of the Arctic Ocean. Murmansk: PINRO Publsh. 183 p. (In Russ.).
- Moiseenko T.I. 2015. The influence of geochemical factors of the aquatic environment on the bioaccumulation of metals in the body of fish // Geokhimiya. No. 3. P. 222-233. (In Russ.).
- Morozov N.P., Petukhov S.A. 1986. Trace elements in the commercial ichthyofauna of the World Ocean. Moscow: Agropromizdat. 160 p. (In Russ.).
- Moore J., Ramamoorthy S. 1987. Heavy metals in natural waters: Applied monitoring and impact assessment. Moscow: Mir. 288 p. (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 fish of the Barents Sea (according to long-term data) // Trudy VNIRO. V. 191. P. 112-123. DOI: 10.36038/2307-3497-2023-191-112-1. (In Russ.).
- Novikov M.A., Gorbacheva E.A., Kharlamova M.N. 2024. Cadmium content in commercial fish of the Barents Sea (according to long-term data) // Trudy VNIRO. V. 198. C. 87-99. DOI: 10.36038/2307-3497-2024-198-87-99. (In Russ.).
- Rodyuk G.N., Chukalova N.N., Shenderyuk V.V., Bakholdina L.P., Chernysheva N.L., Sayadov S.O. 2012. Occurrence of ulcerative skin lesions in cod (*Gadus morhua callarias* L.) under anthropogenic pollution conditions in the southeastern Baltic Sea // Biologiya vnutrennix vod. No. 1. P. 100-106. (In Russ.).
- Guide to chemical analysis of land surface waters. 1977. / A.D. Semenov ed. Leningrad: Gidrometeoizdat, 541 p. (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.).
- Khristoforova N.K., Litvinenko A.V., Alekseev M.Yu., Tsygankov V.Yu. 2023. Trace element content in the pink salmon from the rivers of the Barents and Okhotsk seas basins // Rossijskij zhurnal biologicheskix invazij. No 2. P. 272-287. (In Russ.). DOI: 10.35885/1996-1499-16-2-272-287
- Shuntov V.P., Temnykh O.S. 2008. Pacific salmon in marine and oceanic ecosystems. Vladivostok: TINRO-center. V. 1. 482 p. (In Russ.).
- Abel P.D. 1996. Water pollution biology. London: Taylor & Francis Ltd. 296 p. DOI: 10.1201/9781482295368
- Bjerregaard P., Andersen C., Andersen O. 2014. Ecotoxicology of metals – sources, transport, and effects on the ecosystem // Handbook on the Toxicology of Metals / G.F. Nordberg, B.A. Fowler, M. Nordberg eds. Elsevier Science, Amsterdam. P. 425-459.
- Campbell P.G.C. 1995. Interactions between trace metals and aquatic organisms: a critique of the free-ion activity model // Metal Speciation and Bioavailability in Aquatic Systems / A. Tessier, D.R. Turner eds. Wiley. P. 45-102.
- Clark R.B. 2011. Marine pollution. Fifth edition. Oxford University Press. USA. 230 p.
- Dietz R., Riget F., Johansen P. 1996. Lead, cadmium, mercury and selenium in Greenland marine animals // The Science of the Total Environment. V. 186. P. 67-93.
- Heath A.G. 2002. Water Pollution and Fish Physiology. Lewis Publishers. 506 p.
- Hodson P.V. 1988. The effect of metabolism on uptake, disposition and toxicity in fish // Aquatic Toxicology. V. 11. P. 3-18.
- Ervik H., Erik T.F., Munro B.J. 2018. Toxic and Essential Elements in Seafood from Mausund, Norway // Environ. Sci. Pollut. V. 25(8). P. 7409-7417. DOI: 10.1007/s11356-017-1000-4
- Garcia-Leston J., Mendez J., Pasaro E., Laffon B. 2010. Genotoxic effects of lead: an updated review // Environ. Int. M. V. 36 (6). P. 623-636. DOI: 10.1016/j.envint.2010.04.011.
- Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B.B., Beeregowda K.N. 2014. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals // Interdiscip. Toxicol. V. 7(2). P. 60-72. DOI: 10.2478/intox-2014-0009
- Julshamn K., Duinker A., Nilsen B.M., Frantzen S., Maage A., Valdersnes S., Nedreaas K. 2013. A baseline study of levels

- of mercury, arsenic, cadmium and lead in Northeast Arctic cod (*Gadus morhua*) from different parts of the Barents Sea // *Mar. Poll. Bull.* V. 67. Iss. 1-2. P. 187-195. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2012.11.038
- 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 J.H., Kang J.C. 2015. The lead accumulation and hematological findings in juvenile rock fish *Sebastes schlegelii* exposed to the dietary lead (II) concentrations // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. V. 115. P. 33-39. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2015.02.009
- Kumar A., Cabral-Pinto M.M.S., Chaturvedi A.K., Shabnam A.A., Subrahmanyam G., Mondal R., Gupta D.K., Malyan S.K., Kumar S.S., Khan A.S., Yadav K.K. 2020. Lead Toxicity: Health Hazards, Influence on Food Chain, and Sustainable Remediation Approaches // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. V. 17(7):2179. DOI: 10.3390/ijerph17072179
- Lee J.W., Choi H., Hwang U.K., Kang J.C., Kang Y.J., Kim K.I., Kim J.H. 2019. Toxic effects of lead exposure on bioaccumulation, oxidative stress, neurotoxicity, and immune responses in fish: A review // *Environ. Toxicol. Pharmacol.* V. 68. P. 101-108. DOI: 10.1016/j.etap.2019.03.010
- Mager E.M. 2012. Lead. Homeostasis and Toxicology of Non-Essential Metals. *Fish Physiology*. V. 31A. / C.M. Wood, A.P. Farrell, C.J. Brauner eds. Amsterdam: Academic Press. P. 186-237.
- Mauffret A., Chouvelon T., Wessel N., Cresson P., Bănară D., Baudrier J., Bustamante P., Chekri R., Jitaru P., Le Loc'h F., Mialet B., Vaccher V., Harmelin-Vivien M. 2023. Trace elements, dioxins and PCBs in different fish species and marine regions: Importance of the taxon and regional features // *Environmental Research*. V. 216, Part 3:114624. DOI: 10.1016/j.envres.2022.114624
- Moiseenko T.I., Gashkina N.A. 2020. Distribution and Bioaccumulation of Heavy Metals (Hg, Cd and Pb) in Fish: Influence of the Aquatic Environment and Climate // *Environ. Res. Lett.* V. 15:115013. DOI: 10.1088/1748-9326/abbf7c
- Phillips D.J.H., Rainbow P.S. 1989. Strategies of trace metal sequestration in aquatic organisms // *Marin Environment Research*. V. 49. P. 83-93.
- Sun T., Wu H., Wang X., Ji C., Shan X., Li F. 2020. Evaluation on the biomagnification or biodilution of trace metals in global marine food webs by meta-analysis // *Environ Pollut.* V. 264:113856. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113856
- Whitfield A.K., Elliott M. 2002. Fish as indicators of environmental and ecological changes within estuaries: a review of progress and some suggestions for the future // *J. Fish Biol.* V. 61. P. 229-250. DOI: 10.1006/jfbi.2002.2079
- Yeom D.-H., Adams S.M. 2007. Assessing effects of stress across levels of biological organization using an aquatic ecosystem health index // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* V. 67 (2). P. 286-295. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2006.07.006

Поступила в редакцию 16.04.2025 г.
Принята после рецензии 04.06.2025 г.