



Среда обитания водных биологических ресурсов

Содержание ртути в промысловых ракообразных Баренцева моря

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

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

² Мурманский арктический университет (ФГАОУ ВО «МАУ»), ул. Коммуны, 9, г. Мурманск, 183038

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 и оценить уровень содержания общей ртути в мышцах и гепатопанкреасе основных промысловых ракообразных Баренцева моря.

Материалом исследования послужили образцы камчатского краба *Paralithodes camtschaticus* и северной креветки *Pandalus borealis*, выловленных в ходе экспедиций «ПИНРО» им. Н.М. Книповича в период 2012–2022 гг. Изучены пробы мышц, а также гепатопанкреаса краба.

Новизна: впервые на большом объёме материала выполнен сравнительный анализ содержания общей Hg в камчатском крабе и северной креветке Баренцева моря. Показано значительное сходство уровней содержания Hg в мышцах креветки и краба на уровне среднего арифметического, но значительные отличия в дисперсии этих величин. Впервые оценены уровни содержания Hg, отражающие природное её содержание в мышцах краба и креветки из Баренцева моря.

Используемые методы: Hg в пробах определяли методом непламенной атомно-абсорбционной спектрофотометрии на гидридной приставке к спектрофотометру фирмы «Shimadzu» (Япония). Статистическую обработку данных и построение диаграмм осуществляли в среде MS Excel и прикладном пакете Statistica 13.

Результаты: показано, что среднее содержание общей Hg в мышцах и гепатопанкреасе исследованных гидробионтов не превышало установленный норматив допустимого содержания 0,2 мг/кг сырой массы. Содержание Hg в гепатопанкреасе краба примерно в 2 раза превышает таковое в мышцах. Сделано предположение о видоспецифичности уровня содержания Hg в мышцах *P. camtschaticus*. Содержание Hg в мышцах *P. borealis* сильно зависит от содержания жира. Предложены расчётные фоновые уровни содержания общей Hg в мышцах *P. camtschaticus* и *P. borealis* Баренцева моря, которые могут быть использованы для выявления антропогенного воздействия.

Практическая значимость: полученные результаты свидетельствуют о соответствии безопасности промысловых ракообразных из Баренцева моря принятым в России требованиям Технического регламента Таможенного союза по содержанию общей ртути.

Ключевые слова: токсичные металлы, камчатский краб *Paralithodes camtschaticus*, северная креветка *Pandalus borealis*, мышцы, гепатопанкреас.

Mercury content in commercial crustaceans of the Barents Sea

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, Kommunny St., Murmansk, 183038 Russia

This study aims to identify the total mercury content in the muscle and hepatopancreas of the main commercial crustaceans from the Barents Sea.

The material for this study was the samples of red king crab *Paralithodes camtschaticus* and northern shrimp *Pandalus borealis* caught during the research cruises conducted by «PINRO» from 2012 to 2022. This study examines the samples of muscle collected from crustaceans, as well as the samples of hepatopancreas collected from the red king crab.

Novelty: This study involves abundant data that was used to make the first comparative analysis of the Hg concentration in red king crab and northern shrimp. A significant similarity in the levels of Hg content in the muscle of shrimp and crab at the mean level was shown. The paper provides maps of average Hg content in the studied species for the entire Barents Sea.

Methods used: the total mercury content in the samples was estimated by flameless atomic absorption spectroscopy analysis using Shimadzu Cold Vapor Atomic Absorption Spectrophotometer (Japan). Statistical data processing and charting were done using MS Excel and application software package of Statistica 13.

Results: The paper shows that the average concentration of Hg in the muscle and hepatopancreas of the studied hydrobionts did not exceed 0.2 mg/kg of wet weight that is the acceptable concentration established

by sanitary standards. The content of Hg in the red king crab' hepatopancreas was about 2 times higher than in the muscle. The paper makes an assumption on the species-specificity of Hg content in the red king crab' muscle. The Hg content in the muscle of *P. borealis* is strongly related to its fattiness. The paper suggests calculated background levels of the total Hg concentration in the muscle of *P. camtschaticus* and *P. borealis* from the Barents Sea.

Practical relevance: The results obtained were used to establish the safety compliance of commercial crustaceans with the requirements adopted in Russia.

Keywords: toxic metals, red king crab *Paralithodes camtschaticus*, northern shrimp *Pandalus borealis*, muscle, hepatopancreas.

ВВЕДЕНИЕ

В полярные регионы ртуть (далее – Hg) переносится преимущественно из природных и антропогенных источников, расположенных в более низких широтах [Kirk et al., 2012]. Значительная её часть транспортируется в Арктику в виде газообразной элементарной Hg [AMAP..., 2002]. Наиболее интенсивно Hg выводится из атмосферы во время полярной весны, в период с начала восхода Солнца до завершения таяния снега [Панкратов и др., 2013]. Эффект резкого уменьшения концентрации Hg в воздухе («истощение» атмосферной ртути – Atmospheric Mercury Depletion Events, AMDE) впервые был зарегистрирован весной на станции мониторинга в Алерте (Alert, канадская высокоширотная Арктика) в 1995 г. [AMAP..., 2011]. По данным исследований только в результате AMDE в Арктике может осаждаться до 100 т ртути в год [Drevnick et al., 2012; Berg et al., 2013].

Ртуть поступает в Северный Ледовитый океан преимущественно в виде двухвалентной неорганической Hg (II), которая связывается, трансформируется или удаляется из морских вод следующими путями: 1) восстановлением до элементарной Hg (0) и эмиссией в атмосферу, 2) осаждением Hg, связанной с частицами взвеси, 3) превращением в метилртуть или диметилртуть, 4) экспортом в Атлантический океан вместе с морскими течениями и льдом [Braun et al., 2015].

Наиболее опасна для живых организмов метилртуть (MeHg). Метилирование ртути может происходить в донных отложениях, в толще воды, в снегу и морском льду [Macdonald, Loseto, 2010]. В результате превращения неорганической Hg в MeHg она приобретает способность к биоаккумуляции и биомагнификации [Chouvelon et al., 2018]. Наибольшее биоаккумуляция Hg происходит на низших трофических уровнях, где концентрация MeHg в микроорганизмах в 105 раз выше, чем в воде [Watras et al., 1998]. Затем концентрирование происходит на каждом последующем трофическом уровне в полярных морских

пищевых цепях с коэффициентом $6 \pm 3,7$ [Lavoie et al., 2013]. Метилртуть поглощается беспозвоночными с пищей или непосредственно из воды значительно интенсивнее, чем неорганическая Hg [Мур, Раммурти, 1987]. После всасывания в кишечнике MeHg попадает в кровотоки и перераспределяется по тканям и органам [Braun et al., 2015]. Считают, что источником 80–90% MeHg для человека являются рыба и другие гидробионты, употребляемые в пищу [Немова и др., 2014]. По известным данным, содержание MeHg в мышцах камчатского краба может достигать 100% от общей Hg [Julshamn et al., 2015], а в морской рыбе 80–99% [Gopakumar et al., 2021].

Показано, что в Арктике низкие температуры приводят к более медленным темпам выведения Hg в окружающую среду, что увеличивает её накопление в арктической биоте [Lavoie et al., 2013]. При этом считают, что проблема биоаккумуляции Hg в верхних звеньях трофической цепи морских экосистем изучена недостаточно [Bank et al., 2021].

Уровню содержания Hg в промысловых рыбах и её воздействию на ихтиофауну Северной Атлантики и Западной Арктики в последнее время посвящено значительное число исследований [Jardine et al., 2009; Julshamn et al., 2011; Немова и др., 2014; Мисенко, Гашкина, 2016; Bank et al., 2021; Gopakumar et al., 2021; Новиков и др., 2023]. Данные по изучению содержания Hg в промысловых беспозвоночных встречаются заметно реже, при этом ряд авторов указывает на неполноту этих исследований [Julshamn et al., 2015; Наревич, Ковековдова, 2017; Лебедева и др., 2018; Ervik et al., 2020; McCormick et al., 2020].

Камчатский краб, *Paralithodes camtschaticus* (Tilesius, 1815) – ценный промысловый вид, его промысел в Баренцевом море ведётся с 2004 г. Среднегодовой вылов в ИЭЗ России в последние годы составляет около 10 тыс. т. В 2021 г. в промысле участвовали 16 судов, что выше показателей последних 10 лет. В географии промысла растёт роль Канинской банки и Канино-Колгуевского мелководья. Медианная ве-

личина промыслового запаса, оценённая на начало 2021 г. составила 216 тыс. т [Состояние сырьевых..., 2021; 2022]. Мясо камчатского краба является сырьём для приготовления деликатесной продукции, обладает хорошими вкусовыми качествами и высокой пищевой ценностью. В пищу употребляется мясо (белого цвета), находящееся в ногах, клешнях и в месте сочленения ног с карапаксом, а также икра. Сырое мясо краба содержит много влаги и мало жира (0,18–0,91%), за исключением печени, в ней содержится до 13–20% жира [Мухин и др., 2021; Лебская и др., 1998; Акулин и др., 2005].

Северная креветка, *Pandalus borealis* Krøyer, 1838 также важный промысловый объект, промысел которого в Баренцевом море и в районе архипелага Шпицберген происходил с середины прошлого столетия. В 2003–2012 гг. промысел креветки был фактически прекращён. С 2013 г. наблюдается возобновление промысловой активности российских креветколовов. С 2017 г. отечественный вылов значительно увеличился, с 4 до 30 тыс. т, достигнув рекордных показателей в 2019 г. В 2019 и 2020 гг. основной вылов северной креветки в Баренцевом море осуществлялся в районе Возвышенности Персея и северо-восточных районах [Баканев, 2020; Состояние сырьевых..., 2021]. Основное направление использования креветки – производство деликатесной пищевой продукции, в том числе варёно-мороженой, консервов, кулинарных изделий. Средний выход мяса креветки – 39–40%; содержание жира в мясе до 1,2%, белка – 18,3–19,7% [Лебская и др., 1998; Химический состав..., 2002].

Согласно ТР ТС 021/2011,¹ в мышцах (филе, фарше) и печени морских промысловых беспозвоночных содержание общей ртути не должно превышать 0,2 мг/кг сырой массы.

Цель работы – исследовать и оценить уровень содержания общей ртути в мышцах и гепатопанкреасе камчатского краба и северной креветки Баренцева моря.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материал для исследований собирался в рамках комплексных научных экспедиций, главным образом, на судах «ПИНРО» им. Н.М. Книповича «Вильнюс», «Фридьоф Нансен», «Профессор Бойко», «Смоленск», «Протей» и др. в рамках выполнения программ государственного мониторинга водных биологических ресурсов.

В настоящей работе представлены результаты анализа проб мышечной ткани камчатского краба (самцы, $n = 155$ экз., собраны в 2012–2022 гг.) и северной креветки ($n = 94$ экз., собраны в 2019–2022 гг.). Оба вида были пойманы во время учётных ловов донным тралом и крабовыми ловушками на акватории Баренцева моря (рис. 1 и 2). Исследование содержания ртути в гепатопанкреасе камчатского краба выполнялось для тех же особей, но на несколько меньшем материале ($n = 131$ экз.). Одна проба краба соответствовала 1 экземпляру размером не менее 100 мм, для чего измеряли ширину карапакса. Из-за малых размеров особей (5–10 мм) одна проба мышц креветки включала материал из 12–15 экземпляров этого вида гидробионтов, отобранных случайным образом из 1 кг.

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

Подготовка и химический анализ проб биоты выполнены в «ПИНРО» им. Н.М. Книповича. Подготовку проб проводили методом «мокрой» минерализации согласно ГОСТ Р 53183–2008.² Предварительно образцы тканей беспозвоночных тщательно измельчали и размешивали до пастообразного состояния. К навеске мышц или гепатопанкреаса 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). После охлаждения минерализат разбавляли деионизированной водой до объёма 60 мл. Общую ртуть в пробах биоты определяли методом непламенной атомно-абсорбционной спектроскопии (метод «холодного пара») на гидридной приставке к атомно-абсорбционному спектрофотометру фирмы «Shimadzu», модель AA 6800 (Япония). В качестве восстановителя ртути использовали борогидрид натрия, газа-носителя – аргон. Условия проведения измерений на приборе следующие: длина волны 253,7 нм, ширина щели 1,0 нм, система коррекции фона D2. Для градуировки использовали Государственные стандартные образцы (ГСО) состава водных растворов ионов ртути (II). Каждая аналитическая серия включала «холостую»

¹ Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС – 021–2011). М.: Росстандарт, 2011. 242 с. <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/standarts/technicalregulationses>.

² ГОСТ Р 53183–2008. Продукты пищевые. Определение следовых элементов. Определение ртути методом атомно-абсорбционной спектроскопии холодного пара с предварительной минерализацией пробы под давлением. М.: Стандартинформ, 2010. 9 с.

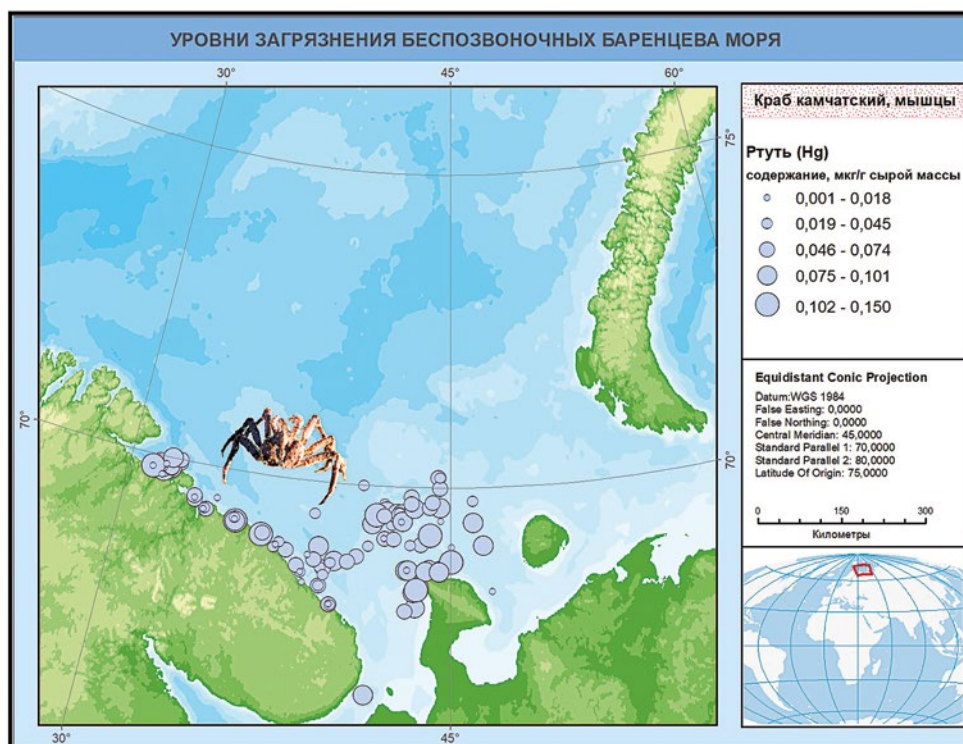


Рис. 1. Карта-схема отбора проб и содержание Hg в мышцах *P. camtschaticus* Баренцева моря, мг/кг сырой массы (по данным 2012–2022 гг.)

Fig. 1. The map of sampling and total mercury content in the muscle of *P. camtschaticus* of the Barents Sea, mg/kg wet weight (according to 2012–2022 data)

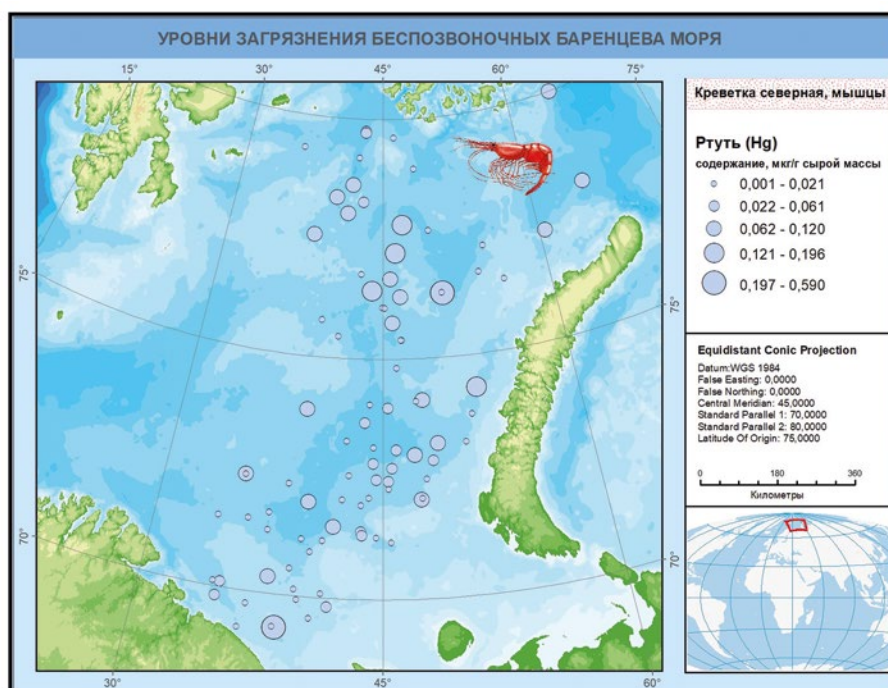


Рис. 2. Карта-схема отбора проб и содержание Hg в мышцах *P. borealis* Баренцева моря, мг/кг сырой массы (по данным 2019–2022 гг.)

Fig. 2. The map of sampling and total mercury content in the muscle of *P. borealis* of the Barents Sea, mg/kg wet weight (according to 2019–2022 data)

пробу, что позволяло контролировать возможное загрязнение образцов в процессе анализа. Содержание ртути в крабе и креветке указывали в мг/кг сырой массы (= мкг/г). Предел обнаружения использованного метода составлял 0,001 мг/кг. Статистическую обработку данных и построение диаграмм осуществляли в среде MS Excel и программе Statistica 13.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Данные по содержанию общей ртути в мышцах исследованных ракообразных, представлены на рис. 1–2 и в табл. 1. Нулевые значения в таблице указывают на то, что содержание Hg в исследованных беспозвоночных было ниже предела обнаружения применяемого метода анализа.

Содержание Hg в мышцах краба *P. camtschaticus* соответствует нормальному распределению по кри-

терию Колмогорова-Смирнова ($p = 0,08$), в случае креветки *P. borealis* распределение содержания Hg в мышцах отличается от нормального ($p < 0,01$). Отмечена высокая вариабельность содержания Hg в пробах мяса креветки ($CV = 163,4\%$). Для краба вариабельность содержания Hg в мышцах была в 2,4 раза ниже ($CV = 68,9\%$).

Как видно из рис. 1 распределение содержания Hg в мышцах краба *P. camtschaticus* относительно равномерное. Выявить географические районы низкого или, наоборот, повышенного содержания Hg не представляется возможным. Для креветки *P. borealis* можно отметить, что содержание Hg в мышцах кажется выше в северной части изученного ареала (рис. 2), а точнее к северу от 75° широты. В то же время, выполненный статистический анализ (корреляция по Спирмену) не выявил связи уровней содержания Hg в креветке

Таблица 1. Содержание общей Hg в мышцах промысловых ракообразных Баренцева моря
Table 1. Total mercury content in the muscle of commercial crustaceans of the Barents Sea

Вид гидробионта	Диапазон содержания, мг/кг	Среднее содержание $\pm m$ / медиана, мг/кг сырой массы	Стандартное отклонение	Фоновый уровень, 95 процентиль
<i>Paralithodes camtschaticus</i> , ♂	<0,001–0,150	$0,050 \pm 0,003$ 0,05	0,035	0,10
<i>Pandalus borealis</i>	<0,001–0,590	$0,048 \pm 0,008$ 0,02	0,079	0,13

Примечание: m – стандартная ошибка среднего арифметического.

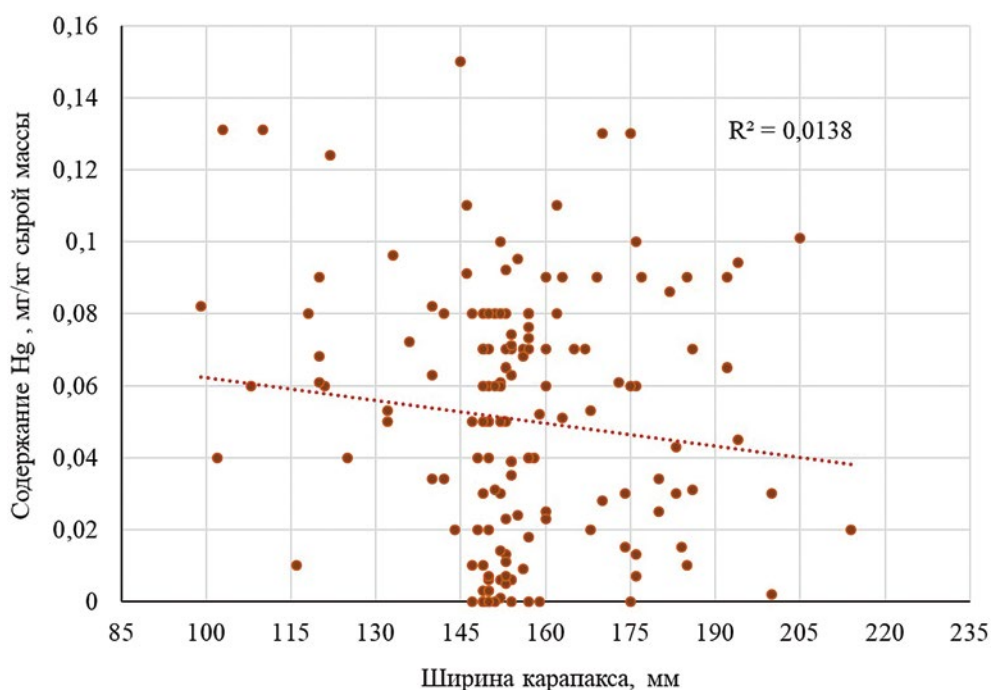


Рис. 3. Связь содержания общей ртути в мышцах *P. camtschaticus* Баренцева моря с шириной карапакса. Приведена линия тренда и коэффициент регрессии

Fig. 3. Correlation between the total mercury content in the muscle of *P. camtschaticus* from the Barents Sea and the width of the carapace. Shown trend line and regression coefficient

с широтой ($r = 0,08$, $p = 0,47$) или долготой ($r = 0,09$, $p = 0,37$) расположения станций отбора проб.

Приведённые в табл. уровни фонового содержания общей Hg в мышцах исследованных ракообразных Баренцева моря заметно ниже установленного норматива 0,2 мг/кг сырой массы. Величины фоновых уровней рассчитаны нами на основе подхода, предложенного ранее [Новиков и др., 2021; Новиков и др., 2023]. Превышение фонового уровня содержания Hg у группы организмов одного вида на нескольких станциях одного района может свидетельствовать в пользу антропогенного загрязнения гидробионтов. Такого в данном исследовании не выявлено.

Ранее нами показано отсутствие связи содержания Hg с массой (размером) трески и пикши Баренцева моря [Новиков и др., 2023]. Аналогичная ситуация выявлена и для камчатского краба. Из рис. 3 следует, что содержание Hg в мышцах *P. camtschaticus* ($n = 152$) практически не коррелирует с шириной карапакса ($r = -0,18$, $p = 0,15$).

Статистическая обработка наших данных показала, что имеют место значимые различия в содержании

Hg в мышцах исследованных ракообразных согласно U-критерию Манна-Уитни, при $p = 0,01$. Эти различия, вероятно, обусловлены высокой изменчивостью содержания Hg в мясе креветки, как это следует из рис. 4.

Среднее содержание жира в мышцах краба составляло по нашим данным $0,39 \pm 0,16\%$, а креветки – $0,85 \pm 0,24\%$. Статистический анализ не выявил существенной связи содержания Hg с содержанием жира в мышцах исследованных крабов $r = 0,19$ (по Пирсону). Исследованные экземпляры северной креветки значительно отличались по содержанию жира. Их можно условно разделить на две группы: I – с нормальным содержанием жира (медиана 1,03%); II – с пониженным содержанием жира (медиана 0,67%).

Группа I включала креветок, выловленных в октябре 2019 г. и ноябре 2020 г., а группа II – выловленных в марте, сентябре 2021 г. и феврале 2022 г. В креветках с нормальным содержанием жира накопление Hg было значимо выше (в 7 раз), чем в экземплярах, характеризующихся низкой жирностью (по U-критерию Манна Уитни; $p = 0,000$) (рис. 5).

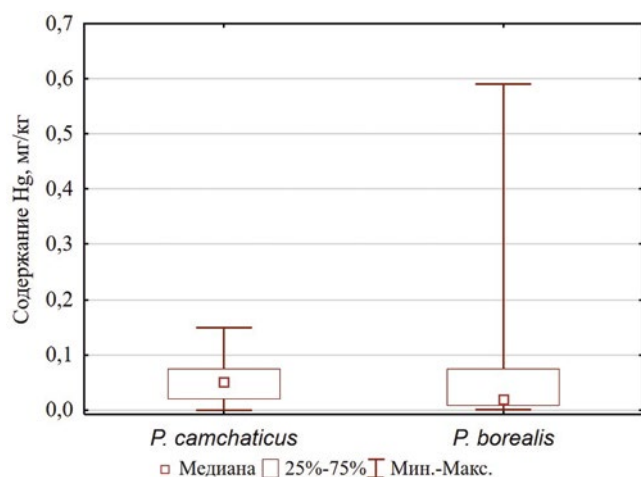


Рис. 4. Сравнительное содержание общей Hg в мышцах краба *P. camtschaticus* и креветки *P. borealis* из Баренцева моря

Fig. 4. Comparative content of total mercury (mg/kg wet weight) in the muscle of the crab *P. camtschaticus* and the shrimp *P. borealis* from the Barents Sea

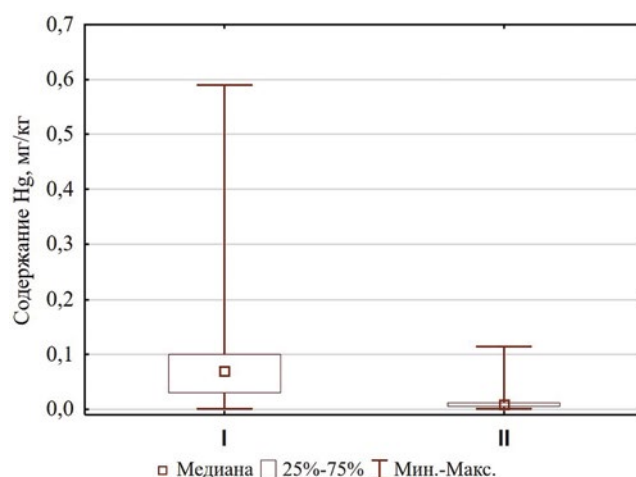


Рис. 5. Содержание общей Hg в мышцах двух групп креветок *P. borealis* с различной жирностью: I – нормальное содержание жира, II – пониженная жирность

Fig. 5. Total mercury content (mg/kg wet weight) in the muscle of two groups of *P. borealis* shrimp with different fat content: I – normal fat content, II – reduced fat content

Таблица 2. Содержание общей ртути в гепатопанкреасе камчатского краба Баренцева моря

Table 2. Total mercury content in the hepatopancreas of red king crab of the Barents Sea

Вид гидробионта	Диапазон содержания, мг/кг	Среднее содержание $\pm m$ / медиана, мг/кг сырой массы	Стандартное отклонение	Фоновый уровень, 95 процентиль
<i>Paralithodes camtschaticus</i>	<0,001–0,213	$0,111 \pm 0,005$ 0,11	0,049	0,18

Примечание: m – стандартная ошибка среднего арифметического.

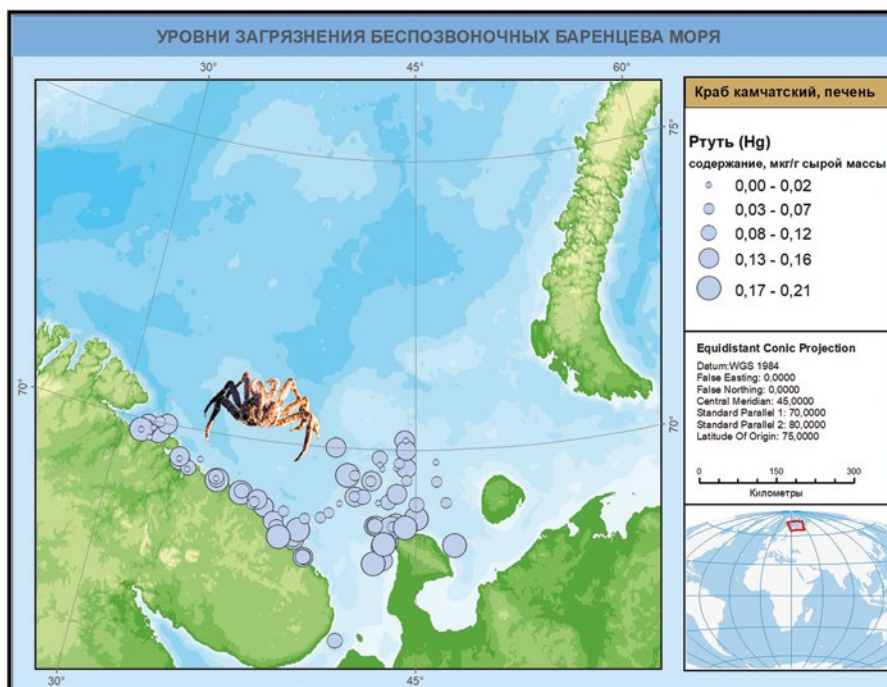


Рис. 6. Содержание общей Hg в гепатопанкреасе *P. camtschaticus* Баренцева моря, мг/кг сырой массы (по данным 2012–2022 гг.)

Fig. 6. Total mercury content in the hepatopancreas of *P. camtschaticus* of the Barents Sea, mg/kg wet weight (according to 2012–2022 data)

Данные по содержанию общей Hg в гепатопанкреасе камчатского краба, представлены в табл. 2 и на рис. 6.

Статистический анализ полученных данных показал, что содержание Hg в гепатопанкреасе исследованных особей краба по критерию Колмогорова-Смирнова соответствовало нормальному распределению ($p = 0,10$). Вариабельность содержания Hg в гепатопанкреасе краба была ниже, чем в мышцах ($CV = 44,1\%$).

Содержание общей Hg в гепатопанкреасе исследованных *P. camtschaticus* Баренцева моря было в среднем в 2 раза выше, чем в мышцах (см. табл. 2). Максимальное содержание Hg в гепатопанкреасе крабов в единичных случаях достигало предельного допустимого уровня, установленного ТР ТС 021/2011¹–0,2 мг/кг сырой массы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно результатам исследований, проведённых ранее норвежскими учёными в западных прибрежных районах Баренцева моря, среднее содержание Hg в мышцах камчатского краба варьирует от 0,002 до 0,14 мг/кг сырой массы со средним значением 0,04 мг/кг [Julshamn et al., 2015]. По известным данным, содержание Hg в мышцах краба *P. camtschaticus*

из Японского моря в 2014–2016 гг. изменялось в диапазоне от 0,01 до 0,05 мг/кг сырой массы со средним значением 0,04 мг/кг [Наревич, Ковековдова, 2017], а в мае 2019 г. – от 0,023 до 0,066 мг/кг со средним 0,041 мг/кг [Ковековдова и др., 2022]. Эти результаты весьма близки к значениям, полученным нами для баренцевоморской популяции. Таким образом, можно констатировать, что среднее содержание Hg в мышцах камчатского краба в определённой мере является видоспецифическим признаком, однако с различной его вариабельностью в морях северной Атлантики и Северной Пацифики.

Среднее содержание Hg в мышцах, обитающего в Баренцевом море краба-стригуна *Chionoecetes opilio* (Fabricius, 1788) ($n = 6$) было заметно выше, чем отмеченное нами у краба *P. camtschaticus*, составляя 0,07 мг/кг сырой массы, а в гепатопанкреасе в 3,7 раза ниже, чем у камчатского краба – 0,03 мг/кг [Лаптева, Плотицына, 2019]. По другим данным [Наревич, Ковековдова, 2017] в мышцах краба *Ch. opilio* из Японского моря среднее содержание Hg обычно составляет 0,03–0,06 мг/кг сырой массы (клешни и фаланги), но в отдельных случаях оно может превышать норматив 0,2 мг/кг (клешни, 2014 г.). Известно также, что среднее содержание Hg в мышцах краба *Ch. opilio* из Охотского моря составляло 0,095 мг/кг сырой мас-

сы [Ковековдова и др., 2022], т. е. было заметно выше, чем в Японском море и ближе к приведённым выше значениям для Баренцева моря. Последнее говорит о том, что для краба *Ch. opilio* среднее содержание Hg в мышцах тоже относительно стабильное и укладывается в интервал 0,07–0,09 мг/кг.

Содержание Hg в мышцах коричневого краба *Cancer pagurus* L., 1758 из прибрежной зоны Центральной Норвегии (Норвежское море) в 2016–2018 гг. варьировало в широких пределах от 0,03 до 0,80 мг/кг сырой массы, в среднем составляя внушительную величину 0,17–0,31 мг/кг сырой массы [Ervik et al., 2020]. Более высокое содержание Hg в мышцах коричневого краба по сравнению с камчатским крабом отмечали и норвежские исследователи, что, по их мнению, обусловлено отличиями в поглощении и метаболизме Hg у этих двух видов [Julshamn et al., 2015].

Ртуть в отличие от других металлов может накапливаться в тканях животных с возрастом (размером, массой), т. к. способна образовывать в них стойкие ртутьорганические комплексы, которые плохо выводятся из организма [Морозов, Петухов, 1986; Rodrigues et al., 2019]. Кроме того, содержание Hg может быть выше в тканях старых и крупных особей из-за их способности поедать более крупные виды добычи, занимающей более высокий трофический уровень и характеризующейся более заметным загрязнением [Braun et al., 2015]. Нам не удалось обнаружить связь между шириной карапакса камчатского краба и содержанием общей Hg в мышцах, вероятно, из-за изучения экземпляров самцов близких размеров (преимущественно с шириной карапакса 145–190 мм). Вместе с тем, норвежские исследователи отмечали значимую положительную корреляцию между шириной карапакса и содержанием Hg в мышцах *P. camtschaticus*, выловленного в юго-западных прибрежных районах Баренцева моря [Julshamn et al., 2015]. Следует отметить, что в исследовании норвежских учёных достаточно равномерно были представлены экземпляры краба с шириной карапакса от 86 до 301 мм. В мясе небольших особей камчатских крабов с шириной карапакса в среднем $105 \pm 1,4$ мм, выловленных у западного побережья Аляски (северо-восточная часть Берингова моря), среднее содержание Hg было ниже – 0,011 мг/кг сырой массы [Jewett, Naidu, 2000].

Гепатопанкреас в организме членистоногих выполняет функции, которые в организме позвоночных выполняют печень и поджелудочная железа. По данным наших исследований содержание общей Hg в гепатопанкреасе исследованных *P. camtschaticus* Барен-

цева моря было в среднем в 2 раза выше, чем в мышцах, что было абсолютно аналогично соотношению содержания Hg в мышцах и печени баренцевоморских рыб [Новиков и др., 2023]. Вместе с тем содержание общей Hg в мышцах и гепатопанкреасе крабов *P. camtschaticus*, выловленных у западного побережья Аляски, было равным [Jewett, Naidu, 2000]. Полагают, что более высокое накопление Hg в печени (или гепатопанкреасе) животных по сравнению с мышцами связано с её функцией детоксикации и указывает на недавнее поступление Hg в организм, в то время как накопление в мышечной ткани отражает длительное воздействие загрязнения [Lacoue-Labarthe et al., 2009; Reifender et al., 1998; Rodrigues et al., 2019]. Вероятно, соотношение содержания общей Hg в мышцах и гепатопанкреасе *P. camtschaticus* может варьировать и зависит от ряда факторов, среди которых содержание Hg в окружающей среде, спектр и интенсивность питания, возраст, темп роста и т. д.

Отмечено, что в отличие от других микроэлементов группы металлов Hg в большей степени накапливается в мышцах из-за высокой степени сродства к активным группам белковых макромолекул –SH, =NH₂, –OH, –COOH [Морозов, Петухов, 1986]. Выведение Hg из мышц происходит медленнее, чем из печени [Rodrigues et al., 2019].

В процессе детоксикации в печени (или гепатопанкреасе) метилртуть может превращаться в неорганическую ртуть. Полагают, что в печени накапливается, главным образом, неорганическая ртуть. Кроме того, печень содержит много липидов, что также может влиять на накопление Hg [Murillo-Cisneros et al., 2018; Onsanit, Wang, 2011; Raimundo et al., 2010; Rodrigues et al., 2019].

В наших исследованиях не удалось выявить связь между накоплением Hg в мышцах камчатского краба и содержанием в них жира. Норвежские исследователи [Julshamn et al., 2015] также отмечают отсутствие связи между жирностью и содержанием Hg в мышцах *P. camtschaticus* и накопление в них преимущественно метилртути (от 0,017 до 0,140 мг/кг с средним $0,050 \pm 0,024$ мг/кг). У креветки *P. borealis*, напротив, нам удалось обнаружить связь между содержанием жира в мышцах и накоплением Hg: рачки с низкой жирностью характеризовались меньшим уровнем загрязнения ртутью.

По известным данным, в креветках *P. borealis*, выловленных в море Баффина у берегов Гренландии в 1987 г., содержание Hg в среднем составляло 0,107 мг/кг сырой массы ($n = 42$) и зависело от их размера: у относительно крупных (>5 мм) особей оно было в 2,4 раза выше, чем у мелких (< 5 мм) [Dietz

et al., 1996]. Таким образом, оно заметно возрастало в процессе роста и развития креветки, в итоге, превышая полученное нами среднее значение в 2 раза. Содержание Hg в мышцах креветки *P. borealis* из Японского моря в период от 2012 до 2015 гг. изменялось в диапазоне 0,02–0,05 мг/кг сырой массы со средним значением 0,03 мг/кг ($n=12-15$, размер особей не указан) [Наревич, Ковековдова, 2017], что несколько ниже полученных нами значений. Подобная ситуация наблюдается в ряду товарных креветок со всего мира, приобретённых в американских магазинах. Согласно исследованиям, выполненным А. McCormick [McCormick et al., 2020], у самых разнообразных креветок: от выращенных в аквакультуре до выловленных в различных районах Мирового океана содержание Hg в мышцах варьировало от 0,004 до 0,03 мг/кг сырой массы, в среднем ($n=159$) оно составило 0,02 мг/кг, что более чем в два раза ниже полученных нами значений. Таким образом, можно утверждать, что содержание Hg у креветок является достаточно вариabельным показателем, тем не менее, можно отметить тенденцию повышения содержания Hg в креветках по мере их продвижения в высокие (северные) широты.

Отмеченная в наших исследованиях высокая вариabельность содержания Hg в мышцах северной креветки Баренцева моря, вероятно, обусловлена целым комплексом факторов, среди которых следует отметить возраст, стадию жизненного цикла, спектр и интенсивность питания. Есть мнение, что возраст особей является одним из наиболее важных факторов, определяющих биоаккумуляцию Hg в мышцах морских организмов [Chouvelon et al., 2012]. Известно также, что в Баренцевом море наблюдаются сезонные изменения массового и размерно-полового состава уловов северной креветки донным тралом из-за вертикальных миграций особей младших возрастных групп, преимущественно самцов и особей, меняющих пол.³ Это обстоятельство препятствует достижению качественного единообразия отбираемого материала (проб), что также может быть одной из причин, отмеченной в наших исследованиях высокой изменчивости содержания Hg в креветке.

Считают также, что отличия в уровнях содержания металлов между особями одного вида или между видами определяются двумя типами факторов: эндогенными – «метаболическими» (возраст, различные механизмы детоксикации ртути, разбавление вследствие роста и т. д.) и экзогенными – воздействие через ды-

хание, пищу (содержание и биодоступность металла в потребляемой пище, в том числе её трофический уровень) [Chouvelon et al., 2012].

По мере получения нового материала, авторы планируют в будущем более детально исследовать влияние отдельных факторов на уровень содержания тяжёлых металлов в организме промысловых беспозвоночных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённых исследований показано, что для промысловых ракообразных Баренцева моря характерно относительно невысокое природное содержание общей Hg в мышцах и гепатопанкреасе. Каких-либо признаков антропогенного загрязнения камчатского краба *P. camtschaticus* и северной креветки *P. borealis* ртутью не обнаружено.

Показано значительное сходство величины содержания общей Hg в мышечной ткани северной креветки и камчатского краба Баренцева моря на уровне среднего арифметического: 0,048 и 0,05 мг/кг сырой массы соответственно.

Сделано предположение о видоспецифичности уровня содержания Hg в мышцах камчатского краба. Вместе тем, последняя величина может варьировать в зависимости от возраста и физиологического состояния особей. Связь содержания Hg с содержанием жира в мясе краба не обнаружена.

Содержание общей Hg в гепатопанкреасе камчатского краба примерно в 2 раза превышает её содержание в мышцах.

Содержание Hg в мышцах *P. borealis* зависит от уровня содержания жира. Последнее может обуславливать высокую вариabельность содержания Hg в мясе креветки.

Предложены расчётные фоновые уровни содержания общей Hg в мышцах краба *P. camtschaticus* и креветки *P. borealis* Баренцева моря: 0,10 и 0,13 мг/кг сырой массы, соответственно. Фоновые уровни отражают современное естественное природное содержание ртути в промысловых ракообразных Баренцева моря и могут быть использованы для выявления признаков антропогенного воздействия на экосистему.

Изученные в настоящем исследовании виды беспозвоночных являются хорошими кандидатами на долгосрочный биомониторинг арктических и субарктических морских экосистем, особенно в контексте недавно вступившей в силу Минаматской конвенции ООН по ртути (UN-MCM)⁴ [Bank et al., 2021]. Важней-

³ Беренбойм Б.И. 1992. Северная креветка (*Pandalus borealis*) Баренцева моря (биология и промысел): Препринт. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 136 с.

⁴ UNEP 2013. Minamata Convention on Mercury. United Nations Environment Programme. 2013. Nairobi, Kenya. 67 p. (<https://digitallibrary.un.org/record/758711>).

шей частью 19 ст. этой конвенции является сбор и интерпретация данных крупномасштабного биомониторинга морских промысловых гидробионтов и установление оценок содержания ртути в различных видах морепродуктов, обычно потребляемых человеком.

Благодарности

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

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

- Акулин В.Н., Касьянов С.П., Рыбин В.Г., Караулов А.Е., Юрьева М.И. 2005. Исследования липидов гидробионтов // Известия ТИНРО. Т. 141. С. 335–347.
- Баканев С.В. 2020. Современные проблемы оценки запаса северной креветки в Баренцевом море // Вопросы рыболовства. Т. 21, № 2. С. 218–234.
- 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. 2-е изд., испр. и доп. М.: ВНИРО. 299 с.
- Ковековдова Л.Т., Симоконь М.В., Наревич И.С. 2022. Особенности формирования элементного состава морскими ракообразными *Paralithodes camchaticus* и *Chionoecetes opilio* // Проблемы региональной экологии. № 5. С. 32–38. DOI: 10.24412/1728–323X-2022–5–32–38.
- Лаптева А.М., Плотицына Н.Ф. 2019. Микроэлементы в крабе-стригуне *Chionoecetes opilio* Баренцева моря // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование. Мат. X Нац. (всеросс.) науч.-практ. конф. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ. С. 35–39.
- Лебедева Н.В., Зимица О.Л., Фатеев Н.Н., Никулина А.Л., Берченко И.В., Мещеряков Н.И. 2018. Ртуть в гидробионтах и среде обитания Грен-фьорда (Западный Шпицберген) ранней весной // Геохимия. № 4. С. 351–362. DOI: 10.7868/S0016752518040052.
- Лебская Т.К., Двинин Ю.Ф., Константинова Л.Л., Кузьмина В.И., Толкачева В.Ф., Мухин В.А., Шаповалова Л.А. 1998. Химический состав и биохимические свойства гидробионтов прибрежной зоны Баренцева и Белого морей. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 150 с.
- Моисеенко Г.И., Гашкина Н.А. 2016. Биоаккумуляция ртути в рыбах как индикатор уровня загрязнения вод // Геохимия. № 6. С. 495–504. DOI: 10.7868/S0016752516060042.
- Морозов Н.П., Петухов С.А. 1986. Микроэлементы в промышленной ихтиофауне Мирового океана. М.: Агропромиздат. 160 с.
- Мухин В.А., Новиков В.Ю., Мухортова А.М., Рысакова К.С., Узбекова О.Р. 2021. Химический состав и биохимические свойства камчатского краба // Камчатский краб в Баренцевом море. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во ВНИРО. С. 391–452.
- Наревич И.С., Ковековдова Л.Т. 2017. Микроэлементы (As, Cd, Pb, Fe, Cu, Zn, Se, Hg) в промысловых ракообразных Японского моря // Известия ТИНРО. Т. 189. С. 147–155.
- Немова Н.Н., Лысенко Л.А., Мещерякова О.В., Комов В.Т. 2014. Ртуть в рыбах: биохимическая индикация // Биосфера. Т. 6, № 2. С. 176–186.
- 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: 10.36038/2307–3497–2023–191–112–123.
- Панкратов Ф.Ф., Коноплев А.В., Махура А., Кац О.В. 2013. Анализ данных долговременного мониторинга концентрации атмосферной ртути и метеорологических величин на полярной станции Амдерме // Метеорология и гидрология. № 6. С. 56–67.
- Химический состав российских пищевых продуктов. 2002. Справочник / Скурихин И.М., Тутельян В.А. ред. М.: ДеЛипринт, 188 с.
- AMAP Assessment 2002: Persistent Organic Pollutants in the Arctic. 2004. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway. 309 p.
- AMAP Assessment 2011: Mercury in the Arctic. 2011. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway. 193 p.
- Azevedo J., Souza S., Oliveira T., Ulrich J. 2012. Tissue-specific mercury concentrations in two catfish species from the Brazilian Coast // Braz. J. Ocean. V. 60. Iss. 2. P. 211–219.
- 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
- Berg T., Pfaffhuber K.A., Cole A.S., Engelsen O., Steffen A. 2013. Ten-year trends in atmospheric mercury concentrations, meteorological effects and climate variables at Zeppelin, Ny-alesund // Atmos. Chem. Phys. V. 13. P. 6575–6586.

- Braune B., Chetelat J., Amyot M., Brown T., Clayden M., Evans M., Fisk A., Gaden A., Girard C., Hare A., Kirk J., Lehnher I., Letcher R., Loseto L., Macdoland R., Mann E., Muir D., O'Driscoll N., Poulain A., Reamer K., Stern G., McMeans B. 2015. Mercury in the marine environment of the Canadian Arctic: review of recent findings // *Sci. Total Environ.* V. 509–510. P. 67–90. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.05.133.
- Chouvelon T., Spitz J., Caurant F., Mèndez Fernandez P., Autier J., Lassus Débat A., Chappuis A., Bustamante P. 2012. Enhanced bioaccumulation of mercury in deep-sea fauna from the Bay of Biscay (north-east Atlantic) in relation to trophic positions identified by analysis of carbon and nitrogen stable isotopes // *Deep Sea Res. Part Oceanogr. Res. Pap.* V. 65. P. 113–124. DOI: 10.1016/j.dsr.2012.02.010
- Dietz R., Riget F., Johansen P. 1996. Lead, cadmium, mercury and selenium in Greenland marine animals // *Sci. Tot. Environ.* V. 186 (1), P. 67–93.
- Drevnick P.E., Yang H.D., Lamborg C.H., Rose N.L. 2012. Net atmospheric mercury deposition to Svalbard: estimates from lacustrine sediments // *Atmos. Environ.* V. 59. P. 509–513.
- Ervik H., Lierhagen S., Asimakopoulou A.G. 2020. Elemental content of brown crab (*Cancer pagurus*) – Is it safe for human consumption? A recent case study from Mausund, Norway // *Sci. Total Environ.* V. 716. 135175. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135175.
- Gopakumar A., Giebichenstein Ju., Raskhozheva E., Borga K. 2021. Mercury in Barents Sea fish in the Arctic polar night: Species and spatial comparison // *Mar. Pollut. Bull.* V. 169. Is. 112501. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112501.
- Jardine L.B., Burt M.D.B., Arp P.A., Diamond A.W. 2009. Mercury comparisons between farmed and wild Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) // *Aquac. Res.* V. 40 (10). P. 1148–1159. DOI: 10.1111/j.1365–2109.2009.02211.X.
- Jewett S.C., Naidu A.S. 2000. Assessment of heavy metals in red king crabs following offshore placer gold mining // *Mar. Pollut. Bull.* Vol. 40 (6). P. 478–490.
- 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 // *Mar. Biol. Res.* 7 (8), 733–745. DOI: 10.1080/17451000.2011.594893.
- Julshamn K., Valdersnes S., Duinker A., Nedreaas K., Sundet J.H., Maage A. 2015. Heavy metals and POPs in red king crab from the Barents Sea // *Food Chemistry.* Vol. 167. P. 409–417. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.07.003.
- Kirk J.L., Lehnher I., Andersson M., Braune B.M., Chan L., Dastoor A.P., Durnford D., Gleason A.L., Loseto L.L., Steffen A., St. Louis V.L. 2012. Mercury in Arctic marine ecosystems: Sources, pathways and exposure // *Environ. Res.* Vol. 119. P. 64–87. DOI: 10.1016/j.envres.2012.08.012.
- Lacoue-Labarthe T., Warnau M., Oberhänsli F., Teyssié J.L., Bustamante P. 2009. Bioaccumulation of inorganic Hg by the juvenile cuttlefish *Sepia officinalis* exposed to ²⁰³Hg radiolabelled seawater and food // *Aquat. Biol.* V. 6. P. 91–98.
- Lavoie R.A., Jardine T.D., Chumchal M.M., Kidd K.A., Campbell L.M. 2013. Biomagnification of mercury in aquatic food webs: a world wise meta-analysis // *Environ. Sci. Technol.* V. 47: 13385–13394. DOI: 10.1021/es403103t
- McCormick A., Robertson M.D., Brasso R., Midway S.R. Mercury concentrations in store-bought shrimp // *Food Sci Nutr.* 2020. V. 8. P. 3731–3737. DOI: 10.1002/fsn3.1659
- Murillo-Cisneros D.A., O'Hara T.M., Castellini J.M., Sánchez-González A., Elorriaga-Verplancken F.R., Marmolejo-Rodríguez A.J., Marín-Enríquez E., Galván-Magaña F. 2018. Mercury concentrations in three ray species from the Pacific coast of Baja California Sur, Mexico: variations by tissue type, sex and length // *Mar. Pollut. Bull.* V. 126. P. 77–85. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.10.060
- Onsanit S., Wang W.X. 2011. Sequestration of total and methyl mercury in different subcellular pools in marine caged fish // *J. Hazard. Mater.* V. 198. P. 113–122.
- Raimundo J., Vale C., Canário J., Branco V., Moura I. 2010. Relations between mercury, methyl-mercury and selenium in tissues of *Octopus vulgaris* from the Portuguese coast // *Environ. Pollut.* V. 158. Is. 6. P. 2094–2100.
- Rodrigues P.A., Ferrari R.G., Santos L.N., Junior A.C. 2019. Mercury in aquatic fauna contamination: A systematic review on its dynamics and potential health risks // *J. Environ. Sci. (Beijing, China).* V. 84. P. 205–218. DOI: 10.1016/j.jes.2019.02.018
- Watras C.J., Back R.C., Halvorsen S., Hudson, R.J.M. Morrison K.A., Wente S.P. 1998. Bioaccumulation of mercury in pelagic freshwater food webs // *Sci. Total Environ.* V. 219 (2–3). P. 183–208. DOI: 10.1016/s0048–9697(98)00228–9

REFERENCES

- Akulin V.N., Kasyanov S.P., Rybin V.G., Karaulov A.E., Yurjeva M.I. 2005. Hydrobionts' lipids research // *Izvestiya TINRO.* V. 141. P. 335–347. (In Russ.).
- Bakanev S.V. 2020. Modern challenges of the northern shrimp stock assessment in the Barents Sea // *Voprosy rybolovstva.* V. 21, № 2. P. 218–234. (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., Simokon M.V., Narevich I.S. 2022. The features of the elemental composition formation by marine crustaceans *Paralithodes camchaticus* and *Chionoecetes opilio* // *Problemy regional'noi ekologii.* № 5. P. 32–38. DOI: 10.24412/1728–323X-2022–5–32–38. (In Russ.).
- Lapteva A.M., Plotitsyna N.F. 2019. Trace elements in the snow crab *Chionoecetes opilio* of the Barents Sea // *Natural resources, their current state, protection, commercial and technical use. Mat. X Nats. (all-Russ.) scient.-pract. conf. Petropavlovsk-Kamchatsky: KamchatSTU.* P. 35–39. (In Russ.).
- Lebedeva N.V., Zimina O.L., Fateev N.N., Nikulina A.L., Berchenko I.V., Meshcheryakov N.I. 2018. Mercury in hydrobionts and their habitat in Grøn fjorden, West Spitsbergen, in early springtime // *Geochemistry (Geohimiya).* № 4. P. 351–362. DOI: 10.7868/S0016752518040052 (In Russ.).

- Lebskaya T.K., Dvinin Yu.F., Konstantinova L.L., Kuz'mina V.I., Tolkacheva V.F., Mukhin V.A., Shapovalova L.A. 1998. Chemical composition and biochemical properties of hydrobionts in the coastal zone of the Barents and White Seas. Murmansk: PINRO Publish. 150 p. (In Russ.).
- Moiseenko G.I., Gashkina N.A. 2016. Bioaccumulation of mercury in fish as indicator of water pollution // *Geochemistry (Geohimiya)*. № 6. P. 495–504. DOI: 10.7868/S0016752516060042 (In Russ.).
- Morozov N.P., Petukhov S.A. 1986. Trace elements in the commercial ichthyofauna of the World Ocean. Moscow: Agropromizdat. 160 pp. (In Russ.).
- Mukhin V.A., Novikov V. Yu., Mukhortova A.M., Rysakova K.S., Uzbekova O.R. 2021. Chemical composition and biochemical properties of red king crab // *The red king crab in the Barents Sea*. 3rd revised and enlarged edition. Moscow: VNIRO Publish. P. 391–452. (In Russ.).
- Narevich I.S., Kovekovdova L. T. Microelements (As, Cd, Pb, Fe, Cu, Zn, Se, Hg) in commercial crustaceans in the Japan Sea // *Izvestiya TINRO*. V. 189. P. 147–155.
- Nemova N.N., Lysenko L.A., Meshcheryakova O.V., Komov V.T. 2014. Mercury in fish: Biochemical indicatio // *Biosfera*. V. 6. № 2. P. 176–186. (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*. Vol. 201, Iss. 4. P. 833–844. DOI: 10.26428/1606–9919–2021–201–833–844.
- 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: 10.36038/2307–3497–2023–191–112–123.
- Pankratov F.F., Konoplev A.V., Makhura A., Kats O.V. 2013. Analysis of the data of long-term monitoring of atmospheric mercury content and meteorological parameters at Amderma polar station // *Russian Meteorology and Hydrology*. V. 38, № 6. P. 405–413.
- Chemical Composition of Russian Food Products*. 2002. The Handbook / Skurihin I.M., Tutel'yan V.A. ed. Moscow: DeLiprint, 188 p. (In Russ.).
- AMAP Assessment 2002: Persistent Organic Pollutants in the Arctic. 2004. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway. 309 p.
- AMAP Assessment 2011: Mercury in the Arctic. 2011. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway. 193 p.
- Azevedo J., Souza S., Oliveira T., Ulrich J. 2012. Tissue-specific mercury concentrations in two catfish species from the Brazilian Coast // *Braz. J. Ocean*. V. 60. Iss. 2. P. 211–219.
- 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
- Berg T., Pfaffhuber K.A., Cole A.S., Engelsen O., Steffen A. 2013. Ten-year trends in atmospheric mercury concentrations, meteorological effects and climate variables at Zeppelin, Ny-alesund // *Atmos. Chem. Phys.* V. 13. P. 6575–6586.
- Braune B., Chetelat J., Amyot M., Brown T., Clayden M., Evans M., Fisk A., Gaden A., Girard C., Hare A., Kirk J., Lehnher I., Letcher R., Loseto L., Macdoland R., Mann E., Muir D., O'Driscoll N., Poulain A., Reamer K., Stern G., McMeans B. 2015. Mercury in the marine environment of the Canadian Arctic: review of recent findings // *Sci. Total Environ.* V. 509–510. P. 67–90. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.05.133.
- Chouvelon T., Spitz J., Caurant F., Mèndez Fernandez P., Autier J., Lassus Débat A., Chappuis A., Bustamante P. 2012. Enhanced bioaccumulation of mercury in deep-sea fauna from the Bay of Biscay (north-east Atlantic) in relation to trophic positions identified by analysis of carbon and nitrogen stable isotopes // *Deep Sea Res. Part Oceanogr. Res. Pap.* V. 65. P. 113–124. DOI: 10.1016/j.dsr.2012.02.010.
- Dietz R., Riget F., Johansen P. 1996. Lead, cadmium, mercury and selenium in Greenland marine animals // *Sci. Tot. Environ.* V. 186 (1), P. 67–93.
- Drevnick P.E., Yang H.D., Lamborg C.H., Rose N.L. 2012. Net atmospheric mercury deposition to Svalbard: estimates from lacustrine sediments // *Atmos. Environ.* V. 59. P. 509–513.
- Ervik H., Lierhagen S., Asimakopoulos A.G. 2020. Elemental content of brown crab (*Cancer pagurus*) – Is it safe for human consumption? A recent case study from Mausund, Norway // *Sci. Total Environ.* V. 716. 135175. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135175.
- Gopakumar A., Giebichenstein Ju., Raskhozheva E., Borga K. 2021. Mercury in Barents Sea fish in the Arctic polar night: Species and spatial comparison // *Mar. Pollut. Bull.* V. 169. Is. 112501. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112501
- Jardine L.B., Burt M.D.B., Arp P.A., Diamond A.W. 2009. Mercury comparisons between farmed and wild Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) // *Aquac. Res.* V. 40 (10). P. 1148–1159. DOI: 10.1111/J.1365–2109.2009.02211.X.
- Jewett S.C., Naidu A.S. 2000. Assessment of heavy metals in red king crabs following offshore placer gold mining // *Mar. Pollut. Bull.* Vol. 40 (6). P. 478–490.
- 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 // *Mar. Biol. Res.* 7 (8), 733–745. DOI: 10.1080/17451000.2011.594893
- Julshamn K., Valdernes S., Duinker A., Nedreaas K., Sundet J.H., Maage A. 2015. Heavy metals and POPs in red king crab from the Barents Sea // *Food Chemistry*. Vol. 167. P. 409–417. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.07.003
- Kirk J.L., Lehnher I., Andersson M., Braune B.M., Chan L., Dastoor A.P., Durnford D., Gleason A.L., Loseto L.L., Steffen A., St. Louis V.L. 2012. Mercury in Arctic marine ecosystems: Sources, pathways and exposure // *Environ. Res.* Vol. 119. P. 64–87. DOI: 10.1016/j.envres.2012.08.012
- Lacoue-Labarthe T., Warnau M., Oberhänsl F., Teyssié J.L., Bustamante P. 2009. Bioaccumulation of inorganic Hg by the juvenile cuttlefish *Sepia officinalis* exposed to ²⁰³Hg radiolabelled seawater and food // *Aquat. Biol.* V. 6. P. 91–98.
- Lavoie R.A., Jardine T.D., Chumchal M.M., Kidd K.A., Campbell L.M. 2013. Biomagnification of mercury in aquatic food webs:

- a world wise meta-analysis // Environ. Sci. Technol. V. 47: 13385–13394. DOI: 10.1021/es403103t
- McCormick A., Robertson M.D., Brasso R., Midway S.R.* Mercury concentrations in store-bought shrimp // Food Sci Nutr. 2020. V. 8. P. 3731–3737. DOI: 10.1002/fsn3.1659.
- Murillo-Cisneros D.A., O'Hara T.M., Castellini J.M., Sánchez-González A., Elorriaga-Verplancken F.R., Marmolejo-Rodríguez A.J., Marín-Enríquez E., Galván-Magaña F.* 2018. Mercury concentrations in three ray species from the Pacific coast of Baja California Sur, Mexico: variations by tissue type, sex and length // Mar. Pollut. Bull. V. 126. P. 77–85. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2017.10.060.
- Onsanit S., Wang W.X.* 2011. Sequestration of total and methyl mercury in different subcellular pools in marine caged fish // J. Hazard. Mater. V. 198. P. 113–122.
- Raimundo J., Vale C., Canário J., Branco V., Moura I.* 2010. Relations between mercury, methyl-mercury and selenium in tissues of *Octopus vulgaris* from the Portuguese coast // Environ. Pollut. V. 158. Is. 6. P. 2094–2100.
- Rodrigues P.A., Ferrari R.G., Santos L.N., Junior A.C.* 2019. Mercury in aquatic fauna contamination: A systematic review on its dynamics and potential health risks // J. Environ. Sci. (Beijing, China). V. 84. P. 205–218. DOI: 10.1016/j.jes.2019.02.018.
- Watras C.J., Back R.C., Halvorsen S., Hudson, R.J.M. Morrison K.A., Wente S.P.* 1998. Bioaccumulation of mercury in pelagic freshwater food webs // Sci. Total Environ. V. 219 (2–3). P. 183–208. DOI: 10.1016/s0048-9697(98)00228-9.

Поступила в редакцию 07.06.2023 г.

Принята после рецензии 07.07.2023 г.