

УДК [597.5–1.05:549.241]/(268.45)

**М.А. Новиков, Е.А. Горбачева, А.М. Лаптева***Полярный филиал ВНИРО (ПИНРО им. Н.М. Книповича),
183038, г. Мурманск, ул. Академика Книповича, 6**СОДЕРЖАНИЕ МЫШЬЯКА В ПРОМЫСЛОВЫХ РЫБАХ
БАРЕНЦЕВА МОРЯ (ПО МНОГОЛЕТНИМ ДАННЫМ)**

На основе многолетних данных (2009–2020 гг.) изучено содержание общего мышьяка в мышцах и печени основных промысловых рыб Баренцева моря: трески *Gadus morhua*, пикши *Melanogrammus aeglefinus*, камбалы-ерша *Hippoglossoides platessoides*, черного палтуса *Reinhardtius hippoglossoides* и морской камбалы *Pleuronectes platessa*. Показано, что среднее содержание общего мышьяка в мышцах исследованных рыб близко к гигиеническому нормативу допустимого содержания общего As — 5 мкг/г сырой массы. Содержание мышьяка в печени рыб примерно в 2 раза превышает таковое в мышцах. Сделан вывод, что для промысловых рыб Баренцева моря характерно повышенное естественное содержание общего мышьяка в тканях. Отмечена высокая вариабельность содержания общего мышьяка в мышцах молоди и рыб основных промысловых размеров. В таких условиях применение действующего норматива безопасного уровня содержания общего As к промысловой рыбе Баренцева моря накладывает избыточные ограничения на ее реализацию как пищевой продукции, напрямую не связанные с ее фактическим качеством. Рекомендован региональный критерий допустимого содержания общего мышьяка в мышцах баренцевоморских рыб 12 мкг/г сырой массы, учитывающий уровень природного фона. Для принципиального решения задачи установления безопасного уровня содержания мышьяка в пищевой рыбной продукции рекомендовано перейти к нормированию уровня содержания неорганического мышьяка как более информативного показателя.

Ключевые слова: токсичные элементы, треска, пикша, палтус, камбала-ерш, мышцы, печень.

DOI: 10.26428/1606-9919-2021-201-833-844.

Novikov M.A., Gorbacheva E.A., Lapteva A.M. Arsenic content in commercial fish of the Barents Sea (according to long-term data) // Izv. TINRO. — 2021. — Vol. 201, Iss. 3. — P. 833–844.

Total content of arsenic in muscles and liver of the main commercial fish species landed in the Barents Sea, as atlantic cod *Gadus morhua*, haddock *Melanogrammus aeglefinus*, long rough dab (american plaice) *Hippoglossoides platessoides*, greenland halibut *Reinhardtius hippoglossoides*, and european plaice *Pleuronectes platessa* is considered on the data collected in 2009–2020. The average As content in the muscles of examined fish met hygienic standards

* Новиков Михаил Аркадьевич, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: mnovik@pinro.ru; Горбачева Елена Анатольевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, e-mail: gorbach@pinro.ru; Лаптева Анна Михайловна, главный специалист, e-mail: lapteva@pinro.ru.

Novikov Mikhail A., Ph.D., leading researcher, Polar Branch of VNIRO (PINRO), 6, Academic Knipovich Str., Murmansk, 183038, Russia, e-mail: mnovik@pinro.ru; Gorbacheva Elena A., Ph.D., researcher, Polar Branch of VNIRO (PINRO), 6, Academic Knipovich Str., Murmansk, 183038, Russia, e-mail: gorbach@pinro.ru; Lapteva Anna M., principal specialist, Polar Branch of VNIRO (PINRO), 6, Academic Knipovich Str., Murmansk, 183038, Russia, e-mail: lapteva@pinro.ru.

for the permissible concentration, i.e. 5 µg/g of wet weight, but the content in liver was about twice higher. High variability of the total As content in muscles of juveniles and adult fish was observed that imposed excessive restrictions on their sales as food products. Taking into account that the increased content of arsenic in tissues of fish in the Barents Sea has natural origin, these restrictions are not directly related to actual quality of the fish raw materials. There is recommended to account the natural background of As and establish a regional criterion for the allowable concentration of total arsenic in the muscles of fish landed in the Barents Sea as 12 µg/g WW. For principal decision on the safe level of arsenic content in fish products, introduction of a new standard for the level of inorganic arsenic content is recommended, that is more reliable and representative indicator.

Key words: toxic element, atlantic cod, haddock, greenland halibut, long rough dab, muscle, liver.

Введение

Известно, что на формирование микроэлементного состава водных организмов оказывают влияние состав среды обитания, состав потребляемой пищи и их биологические особенности [Морозов, Петухов, 1986; Виноградов, 2001].

Накопление в органах и тканях морских гидробионтов многих микроэлементов обусловлено их способностью замещать другие, близкие по свойствам, микроэлементы. Арсениты, будучи аналогами фосфатов, в известной степени определяют накопление мышьяка в организме гидробионтов [Мур, Рамамурти, 1987]. В морских животных преобладающей формой мышьяка становится арсенобетаин, триметилированное пентавалентное соединение мышьяка, выявленное в 1977 г. [Edmonds et al., 1977]. Содержание мышьяка в гидробионтах зависит от сезона и связано с особенностями питания. Следует отметить, что мышьяк поглощается гидробионтами в основном с пищей и его токсичные неорганические соединения способны быстро образовывать прочные комплексы с низкомолекулярными органическими соединениями, которые не представляют опасности для человека и к тому же быстро выводятся из организма [Мур, Рамамурти, 1987].

Считают, что в морских экосистемах мышьяк находится в 4 основных химических формах: арсенаты — HAsO_4^{2-} ; арсениты — HAsO_2 ; метиларсенаты — $\text{CH}_3\text{AsO}(\text{OH})\text{O}^-$; диметиларсенаты — $(\text{CH}_3)_2\text{AsO}_2^-$. Арсенаты — наиболее термодинамически стабильная форма мышьяка, которая преобладает в океане. В природных условиях 95–100 % всего мышьяка находится в виде неорганических соединений (в основном арсенатов), а 2–5 % — в виде органических соединений (в основном метиларсенатов). Метиларсенаты концентрируются в основном в фотической зоне (в зоне первичной продукции). Максимальная концентрация метиларсенатов здесь равна 0,015–0,230 мкг/л, в то время как на глубине 400 м их средняя концентрация понижается до 0,0083 мкг/л. Планктонные водоросли могут производить соединения метиларсенатов, которые, в свою очередь, могут восстанавливать арсенаты до арсенитов [Емельянов, Кравцов, 2007]. По некоторым данным, мышьяк в заметных количествах находится в морской взвеси, составляя порядка 11–14 мкг/г, и в океаническом планктоне — около 10 мкг/г; в незагрязненных донных отложениях океанов содержится 5–10 мкг As на грамм сухой массы осадка [Батулин и др., 1993; Емельянов, Кравцов, 2007].

Известно, что токсическое действие мышьяка возникает только после его биологического окисления до арсеноксидов (R-As=O), если он входит в молекулу органического вещества, или до мышьяковистой кислоты (HO-As=O). При этом соединения пентавалентного As приобретают биологическую активность только после восстановления до арсеноксидов [Альберт, 1989a]. В основе механизма токсического действия соединений мышьяка лежит взаимодействие с сульфгидрильными группами (SH-группы, тиольные группы) белков и энзимов. Это действие обусловлено главным образом реакцией соединений трехвалентного мышьяка с молекулами со смежным расположением SH-групп, в результате чего образуются прочные циклические структуры

[Альберт, 1989б]. Действие As (III) направлено на блокаду пируватдегидрогеназного комплекса, играющего важную роль в гликолитических процессах [Хмельницкий и др., 1987]. Squibb и Fowler [1983] обнаружили, что As (III) в 10 раз токсичнее As (V) и в 70 раз токсичнее, чем монометиларсенаты (V) и диметиларсенаты (V).

Известно, что неорганический мышьяк даже в небольших дозах канцерогенен, способен вызывать рак легких, мочевого пузыря, почек, печени и кожи*. Поэтому Европейское агентство по безопасности пищевых продуктов (EFSA) предложило фиксированный уровень допустимого содержания неорганического мышьяка в морепродуктах вместо ранее использованного процентного отношения к общему As, а именно: 0,03 мг/кг (мкг/г) сырой массы для рыбного филе и 0,10 мг/кг для других морепродуктов**. Однако, по мнению норвежских исследователей морских биоресурсов, предложенная величина сильно завышена [Julshamn et al., 2012].

Согласно СанПиН 2.3.2.1078-01 в мышцах (филе, фарш) морских рыб содержание общего мышьяка не должно превышать 5 мкг/г сырой массы; в печени рыб содержание этого микроэлемента в РФ не нормируется.

Материалы и методы

Материал для исследований собирался в рамках комплексных научных экспедиций, главным образом на судах ПИНРО «Вильнюс» и «Фритьоф Нансен», в рамках выполнения программ государственного мониторинга водных биологических ресурсов.

В настоящей работе представлены результаты анализа проб мышечной ткани 5 промысловых рыб Баренцева моря: атлантической трески *Gadus morhua* ($n = 373$), пикши *Melanogrammus aeglefinus* ($n = 248$), камбалы-ерша *Hippoglossoides platessoides* ($n = 193$), черного, или синекорого палтуса *Reinhardtius hippoglossoides* ($n = 153$) и морской камбалы *Pleuronectes platessa* ($n = 81$), — пойманных в результате учетных тралений в период с 2009 по 2020 г. включительно практически на всей акватории Баренцева моря. Есть одно исключение: для черного палтуса пробы за 2009 г. отсутствуют (не пойман). Всего для отбора материала было выполнено более 500 траловых станций. Исследование содержания мышьяка в печени выполнялось для тех же рыб, но на несколько меньшем количестве экземпляров.

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

Подготовка и химический анализ проб биоты выполнены в ПИНРО в соответствии с действующими методическими руководствами [ГОСТ Р 51766-2001]. Подготовка проб проводили методом «мокрой» минерализации азотной кислотой с перекисью водорода в микроволновой системе пробоподготовки МС-6 (НТФ «Вольта», Санкт-Петербург, Россия). Содержание общего мышьяка в пробах биоты определяли на атомно-абсорбционном спектрофотометре фирмы «Shimadzu», модель AA-6800 (Япония), атомизатор — графитовая кювета (электротермический способ), корректор фона — дейтериевая лампа. Для уменьшения помех применяли раствор матричного модификатора № 7289 фирмы «Merck» с концентрацией палладия 0,5 г/дм³. Для калибровки использовали стандартный образец раствора ионов мышьяка ГСО 7143-95. Относительная погрешность определения As составляла не более 5 %.

Содержание мышьяка в промысловых рыбах указывали в микрограммах на грамм сырой массы. Статистическую обработку данных и построение диаграмм осуществляли в среде MS Excel.

* Evaluation of certain food additives and contaminants: 33rd Report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives : Tech. Rep. Ser. 776. Geneva, 1989. 64 p.

** EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM); Scientific Opinion on Arsenic in Food: EFSA J. 2009. Vol. 7, Iss. 10. 1351. DOI: 10.2903/j.efsa.2009.1351.

Результаты и их обсуждение

Данные по содержанию общего мышьяка в мышцах баренцевоморских рыб приведены в табл. 1. Как видно из данных таблицы, среднее содержание общего мышьяка в мышцах основных промысловых видов Баренцева моря весьма близко к уровню норматива и характерно для значительной части особей промысловых популяций. Анализ межгодовой динамики показателей содержания общего мышьяка в мышцах исследованных рыб не выявил достоверных трендов (рис. 1).

Таблица 1

Содержание общего мышьяка в мышцах промысловых рыб Баренцева моря

Table 1

Total arsenic content in muscles of commercial fish from the Barents Sea

Вид рыбы	Диапазон содержания, мкг/г	Среднее содержание ± m, мкг/г сырой массы	Доля рыб с превышением норматива содержания As, %	Фоновый уровень, 95-й процентиль
<i>Gadus morhua</i>	0,01–21,25	4,19 ± 0,17	34,6	10,0
<i>Melanogrammus aeglefinus</i>	0,10–22,20	4,92 ± 0,24	44,4	11,9
<i>Hippoglossoides platessoides</i>	0,10–12,75	5,13 ± 0,20	46,7	11,1
<i>Reinhardtius hippoglossoides</i>	0,40–11,91	3,78 ± 0,17	17,0	7,6
<i>Pleuronectes platessa</i>	1,01–8,70	4,64 ± 0,18	39,5	7,1

Примечание. m — стандартная ошибка среднего.

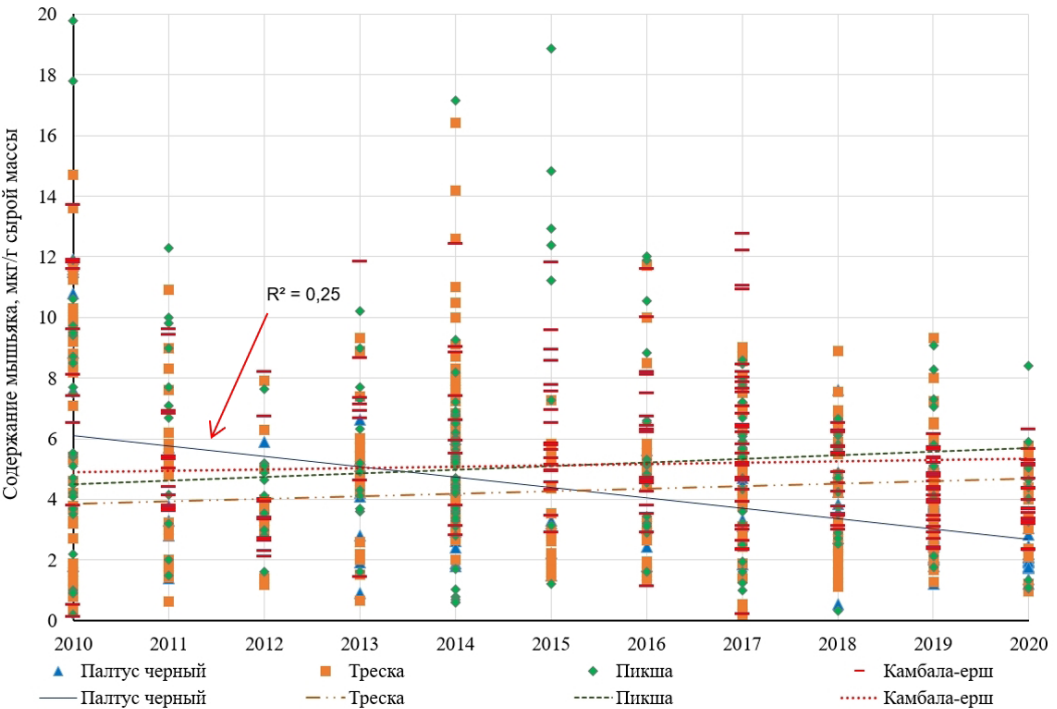


Рис. 1. Динамика содержания общего мышьяка в мышцах промысловых рыб Баренцева моря в период 2010–2020 гг. с указанием линий трендов и коэффициента регрессии для палтуса
Fig. 1. Dynamics of total arsenic content in muscles of commercial fish from the Barents Sea (2010–2020). Linear trends are shown, coefficient of linear regression is indicated for greenland halibut

Таким образом, высокое с точки зрения норматива содержание мышьяка в мышцах в реальности является физиолого-биохимической нормой для популяций рассмотренных представителей ихтиофауны Баренцева моря. Нормой потому, что, во-первых, указанный уровень содержания мышьяка характерен для значительного количества

особей в популяции и, во-вторых, отклонений от нормальной физиологии основной массы промысловых рыб Баренцева моря не наблюдается [The Barents Sea..., 2011]. Отсюда очевидно, что превышение санитарно-гигиенического критерия в 5 мкг/г до определенного предела не может достоверно свидетельствовать о загрязнении или критическом (опасном) содержании мышьяка в промысловой рыбе из Баренцева моря.

В дополнение можно привести данные иностранных исследователей, относящиеся к рассматриваемому региону. Так, согласно данным норвежских исследователей в мышцах атлантической трески из Баренцева, Норвежского и Северного морей, выловленной в 1995–2000 гг., среднее содержание общего мышьяка составляло 6,2 мкг/г сырой массы ($n = 150$) с диапазоном фактического содержания 0,5–52,0 мкг/г [Julshamn et al., 2004], что на 32,4 % выше наших значений. По данным этих же ученых в период 2006–2010 гг. в мышцах трески из Норвежского и западной части Баренцева морей содержание общего мышьяка составило в среднем уже 10,5 мкг/г сырой массы ($n = 190$) с диапазоном содержания 0,38–110,0 мкг/г [Julshamn et al., 2012]. Таким образом, согласно приведенным значениям с 1995 по 2010 г. наблюдалось увеличение содержания общего мышьяка в мышцах трески, в то время как в мышцах черного (гренландского) палтуса этого отмечено не было. Среднее содержание As в палтусе за весь период исследований по норвежским данным [Julshamn et al., 2011, 2012] составляло порядка 8,1–11,3 мкг/г сырой массы, что значительно выше полученных нами значений (табл. 1). При этом содержание неорганического As в рыбах из исследованных северных европейских морей было очень низким: в 94 % случаев оно было ниже предела обнаружения примененного метода анализа (высокоэффективная жидкостная хроматография) — $< 0,002$ мкг/г сырой массы. Максимальные значения неорганического As, отмеченные для сайды и трески, составляли соответственно 0,015 и 0,006 мкг/г сырого веса [Julshamn et al., 2012].

Приведенные нами в табл. 1 значения среднего содержания мышьяка в мышцах промысловых рыб из Баренцева моря, несомненно, соответствуют региональному фоновому уровню, но характеризуют его только отчасти. Согласно правилам статистики значения нормального содержания мышьяка в рыбах из исследованной области — генеральной совокупности — будут распределяться в диапазоне среднее значение $\pm$ две величины стандартного отклонения ($\pm 2\sigma$) с вероятностью 95 % [Лакин, 1980]. Иными словами, у 95 % рыб. Поскольку далеко не во всех случаях исследователь имеет дело с нормальным распределением измеряемых величин, предпочтительнее использовать расчет величины 95-го перцентиля, как это было сделано нами ранее для установления фоновых уровней содержания микроэлементов в воде Баренцева моря [Новиков, Драганов, 2017]. Искомые величины фонового содержания мышьяка для исследованных промысловых рыб приведены в табл. 1. С вероятностью 95 % можно утверждать, что в пределах указанной величины содержание мышьяка соответствует его естественному природному уровню, характерному для данного вида рыб в Баренцевом море. Поэтому приходится констатировать, что установленный норматив по содержанию As 5 мкг/г сырой массы вступает в противоречие с естественным природным фоновым его содержанием в рыбе и накладывает необоснованные избыточные ограничения на реализацию продукции из нее для пищевого использования. Иными словами, норматив не учитывает региональную специфику.

Норвежскими исследователями показано, что содержание общего мышьяка в мышцах трески из Баренцева моря ($n = 165$) [Julshamn et al., 2012] и черного палтуса из Норвежского моря ($n = 320$) [Julshamn et al., 2011] практически не коррелирует с массой рыбы. Этот факт отмечен и нами для трески и пикши соответственно при $n = 138$ и $n = 121$ (рис. 2). Тем не менее, анализируя представленные на рис. 2 данные, можно отметить, что вариабельность содержания общего мышьяка в мышцах трески намного сильнее выражена у ее молоди и рыб основных промысловых размеров (2–7 кг). Далее она имеет тенденцию к снижению при дальнейшем увеличении возраста и массы. Та же закономерность отмечена и для пикши.

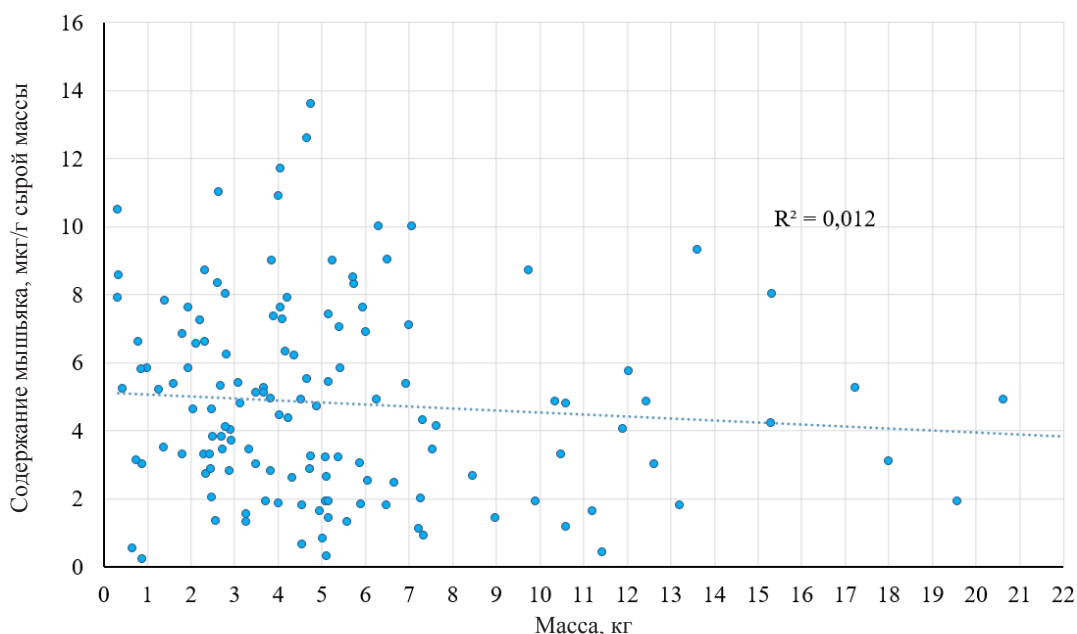


Рис. 2. Связь содержания общего мышьяка в мышцах трески Баренцева моря с массой рыбы с указанием линии тренда и коэффициента регрессии

Fig. 2. Dependence of total arsenic content in muscles of cod from the Barents Sea on the fish body weight. Linear trend and coefficient of linear regression are shown

Аналогично согласно норвежским данным [Julshamn et al., 2012] наибольшее и наименьшее содержание мышьяка регистрируется у особей трески массой до 6 кг, соответственно 110,0 и 0,38 мкг/г сырой массы. У рыб большей массы, а соответственно, и возраста содержание мышьяка в мышцах варьировало заметно меньше и не превышало 34 мкг/г сырой массы. По всей видимости, главную роль в содержании мышьяка в организме рыб играет их физиологическое состояние (уровень обмена веществ) и состав пищи.

Содержание общего мышьяка в мышцах камбал (малоротая, колючая) из зал. Петра Великого (Японское море) составляло 3,0–4,6 мкг/г сырой массы [Ковековдова и др., 2016], что полностью согласуется с приведенными нами данными по морской камбале из Баренцева моря.

Согласно данным норвежских исследователей [Julshamn et al., 2012] среднее содержание общего мышьяка в мышцах скумбрии атлантической из разных районов Норвежского моря в 2006–2010 гг. варьировало в диапазоне от ниже предела обнаружения до 3,3 мкг/г сырой массы с максимальным значением 4,3 мкг/г. Аналогично по данным, приведенным Е.С. Чупиковой с соавторами [2019], в период с 2014 по 2017 г. у японской скумбрии *Scomber japonicus*, выловленной в Северной Пацифике, содержание общего мышьяка в мышцах, как правило, не превышало норматив, варьируя от 0,049 до 1,810 мкг/г сырой массы. В мышцах норвежской весенненерестующей сельди *Clupea harengus* в 2006–2007 гг. содержание общего мышьяка мало отличалось от такового у скумбрии, изменялось от 0,79 до 4,30 мкг/г сырой массы со средним 2,20 мкг/г сырой массы и зависело от сезона года [Frantzen et al., 2015]. Отметим, что скумбрия и сельдь — преимущественно зоопланктофаги, питающиеся в пелагиали.

Из наших и представленных выше опубликованных материалов можно сделать заключение, что у типичных донных рыб-бентофагов, в нашем случае у камбалы-ерша и пикши, среднее содержание общего мышьяка в мышцах ожидается выше, чем у рыбоядных пелагических хищников, таких как черный палтус, треска, скумбрия и др.

К подобному выводу приходят и зарубежные исследователи [Neff, 1997; Julshamn et al., 2011]. Это, вероятно, связано с тем, что многие бентосные организмы, в том числе и в Баренцевом море, такие как брюхоногие моллюски, ракообразные, иглокожие и полихеты, содержат значительное количество общего мышьяка, превышающее его среднее содержание в рыбе [Лаптева, Плотицына, 2017, 2019; Лаптева, 2018]. Кроме того, и организмы бентоса, и рыбы-бентофаги, в том числе и камбала-ерш, способны активно захватывать донные осадки в процессе питания [Жизнь и условия..., 1986; Берестовский, 1995], которые также содержат общий мышьяк в значительном количестве. Например, в донных отложениях западной части Баренцева моря среднее содержание мышьяка составляет порядка 18 мкг/г сухой массы осадка [Лаптева, Плотицына, 2017].

Содержание общего мышьяка в печени исследованных промысловых рыб было выше, чем в мышцах (табл. 2). При том что содержание As в печени рыб законодательством РФ не нормируется, есть технический регламент Таможенного союза*, в котором приводится единый норматив содержания мышьяка «на все виды рыбной продукции (кроме икры, молоков, рыбного жира)», все те же 5 мкг/г сырой массы. Этот норматив практически «закрывает» использование печени баренцевоморских рыб в качестве пищевой продукции, так как превышение содержания As в печени баренцевоморских рыб по отношению к содержанию в мышцах в среднем составляет 2 раза. Этот показатель, по нашим данным, заметно ниже такового, рассчитанного, например, для тяжелых металлов. Так, более всего в печени исследованных рыб по сравнению с мышцами накапливается медь — от 18,3 раза у пикши до 26,1 у камбалы-ерша. Далее по нисходящей идут кадмий, железо и цинк.

Таблица 2
Содержание общего мышьяка в печени промысловых рыб Баренцева моря
Table 2
Total arsenic content in liver of commercial fish from the Barents Sea

Вид рыбы	Диапазон содержания, мкг/г	Среднее содержание $\pm m$, мкг/г сырой массы	Превышение содержания в мышцах, разы
<i>Gadus morhua</i>	0,14–63,90	$7,37 \pm 0,47$	1,53
<i>Melanogrammus aeglefinus</i>	0,10–80,20	$9,20 \pm 0,74$	1,69
<i>Hippoglossoides platessoides</i>	0,40–52,0	$11,97 \pm 0,76$	2,23
<i>Reinhardtius hippoglossoides</i>	0,02–44,50	$12,37 \pm 1,15$	3,27
<i>Pleuronectes platessa</i>	0,81–20,67	$7,0 \pm 0,66$	1,47

Примечание. m — стандартная ошибка среднего.

Очевидно, что отсутствие отдельного норматива на содержание As в печени морских рыб в упомянутом техническом регламенте не прибавляет ясности в вопросе безопасного использования пищевой рыбной продукции и, на наш взгляд, является недоработкой.

Содержание мышьяка в печени рыб Баренцева моря на протяжении всего периода исследований было так же стабильно, как и в мышцах. Межгодовой тренд содержания As в печени отсутствовал у всех видов рыб, кроме палтуса. У последнего, как и в случае содержания As в мышцах, отмечен слабый тренд на снижение с коэффициентом корреляции $R = 0,11$.

В научной литературе сведения о содержании мышьяка в печени рыб весьма скудные. По опубликованным данным, в 5 видах донных рыб (*Pomadasys* sp., *Platycephalus* sp., *Epinephelus tauvina*, *Otolithes ruber*, *Pampus argenteus*) из Персидского залива

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

среднее содержание мышьяка в печени превышало накопление этого элемента в мышцах в 1,4 раза [Agah et al., 2009], что согласуется с результатами наших исследований. Причем среднее содержание мышьяка в мышцах и печени рыб, выловленных в Персидском заливе, оказалось значительно ниже, чем в изученных видах рыб Баренцева моря, и составляло соответственно 0,3–1,0 и 0,42–2,50 мкг/г сырой массы. Принято считать, что наибольшее количество As концентрируется у рыб в жировой фракции печени и других органов [Виноградов, 2001]. Это, вероятно, связано с тем, что соли мышьяка, являясь аналогами фосфатов, включаются в метаболизм морских рыб [Мур, Рамамурти, 1987]. На млекопитающих показано, что печень обычно является основным органом-мишенью для метаболизма мышьяка [Marafante et al., 1985; Geubel et al., 1988; Khairul et al., 2017].

В рыбах поступающий с пищей или водой мышьяк может подвергаться метилированию с образованием менее токсичных органических форм [Zhang et al., 2016a], а также возможен синтез металлсвязывающих белков, таких как металлотионеин-подобные белки [Zhang et al., 2012]. Исследование двух видов хищных морских рыб, *Terapon jarbua* и *Acanthopagrus schlegeli*, выращенных в садковом хозяйстве в Шэньжэне (Китай), показало, что As в их печени представлен главным образом органическими соединениями (преимущественно арсенобетаин), содержание которых достигало соответственно 94,8 и 99,5 % от общего содержания As [Zhang et al., 2016b]. Полагают, что в рыбе содержится больше арсенобетаина по сравнению с другими видами гидробионтов, такими, например, как моллюски и ракообразные. Последние могут содержать 25–45 % потенциально токсичных и способных к биоаккумуляции соединений мышьяка, таких как арсеносахара [Li et al., 2003; Feldman, Krupp, 2011].

Несмотря на то что органические формы считаются менее токсичными, есть сведения, что соединения трехвалентного метилированного мышьяка, монометиларсонистой (III) и диметиларсинистой (III) кислот более токсичны для млекопитающих, чем неорганический мышьяк, потому что они более эффективно вызывают разрушение ДНК [Styblo et al., 2000; Dopp et al., 2004]. Соединения мышьяка в трехвалентной степени окисления проявляют сильные генотоксические эффекты, возможно, потому, что трехвалентные органические соединения мышьяка легче проникают через мембраны, чем пятивалентные соединения [Dopp et al., 2004].

Заключение

Проведенные исследования показали, что для промысловых рыб Баренцева моря характерно относительно высокое природное содержание общего мышьяка в тканях. В таких условиях применение норматива безопасного уровня содержания общего мышьяка к промысловой рыбе Баренцева моря накладывает избыточные ограничения на ее реализацию как пищевой продукции, напрямую не связанные с ее фактическим качеством. Исходя из этого, следует считать фоновым и допустимым (нормативным) уровнем содержания общего мышьяка в мышцах промысловых рыб Баренцева моря 12 мкг/г (мг/кг) сырой массы и меньше. Подобный региональный показатель, если он будет принят в качестве дополнения, позволит избежать противоречия с существующим нормативом СанПиН 2.3.2.1078-01. В качестве объектов нормирования показателей содержания мышьяка в мышцах промысловых рыб рекомендуем использовать донную рыбу, питающуюся преимущественно бентосом. В случае Баренцева моря это пикша *M. aeglefinus*.

Для принципиального решения проблемы нормирования пищевой рыбной продукции на содержание мышьяка необходимо выполнять количественный анализ присутствия его неорганических форм как наиболее токсичных для млекопитающих, включая человека. Содержание неорганического мышьяка в общем мышьяке, как правило, очень низкое. На данном этапе целесообразно использовать норматив, предложенный Европейским агентством по безопасности пищевых продуктов, устанавливающий до-

пустимое содержание неорганического мышьяка в пищевой рыбе на уровне 0,03 мг/кг (мкг/г) сырой массы рыбного филе*.

Благодарности

Авторы выражают благодарность начальнику центра экологического мониторинга ПИНРО им. Н.М. Книповича, к.х.н. А.Ю. Жилину за ценные советы и замечания, которые были учтены при подготовке рукописи.

Финансирование работы

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Соблюдение этических стандартов

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

Список литературы

- Альберт А. Избирательная токсичность : моногр. — М. : Медицина, 1989а. — Т. 1. — 400 с.
- Альберт А. Избирательная токсичность : моногр. — М. : Медицина, 1989б. — Т. 2. — 432 с.
- Батурин Г.Н., Емельянов Е.М., Стрюк Л.В. О геохимии планктона и взвеси Балтийского моря // Океанол. — 1993. — Т. 33, № 1. — С. 126–132.
- Берестовский Е.Г. Питание и пищевая стратегия камбалы-ерша *Hippoglossoides platessoides limantoides* в Баренцевом и Норвежском морях // Вопр. ихтиол. — 1995. — Т. 35, № 1. — С. 94–104.
- Виноградов А.П. Химический элементарный состав организмов моря : моногр. — М. : Наука, 2001. — 620 с.
- Емельянов Е.М., Кравцов В.А. О причинах повышенных содержаний мышьяка в Балтийском море и Вислинском заливе // Геохимия. — 2007. — № 8. — С. 871–888.
- Жизнь и условия ее существования в бентали Баренцева моря : моногр. / ред. Г.Г. Матишов. — Апатиты : КФ ММБИ АН СССР, 1986. — 220 с.
- Изучение экосистем рыбохозяйственных водоемов, сбор и обработка данных о водных биологических ресурсах, техника и технология их добычи и переработки. 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. / отв. ред. М.С. Шевелев — М. : ВНИРО, 2004. — 300 с.
- Ковековдова Л.Т., Кикун Д.П., Касьяненко И.С. Мониторинг водной среды и безопасности промысловых объектов в дальневосточном рыбохозяйственном бассейне (токсичные элементы) // Морские биологические исследования: достижения и перспективы : сб. мат-лов Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, приуроч. к 145-летию Севастопольской биологической станции. — Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика. — 2016. — Т. 3. — С. 111–114.
- Лакин Г.Ф. Биометрия : учеб. пособие. — М. : Высш. шк., 1980. — 292 с.
- Лаптева А.М. Микроэлементарный состав камчатского краба (*Paralithodes camtschaticus*) Баренцева моря // Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана : мат-лы 5-й Междунар. науч.-техн. конф. — Владивосток : Дальрыбвтуз, 2018. — Ч. 1. — С. 123–127.
- Лаптева А.М., Плотицына Н.Ф. Микроэлементы в донных отложениях Баренцева моря на стандартном разрезе «Кольский меридиан» // Вестн. МГТУ. — 2017. — Т. 20, № 1–2. — С. 242–251. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-242-251.
- Лаптева А.М., Плотицына Н.Ф. Микроэлементы в крабе-стригуне *Chionoecetes opilio* Баренцева моря // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование : мат-лы 10-й Нац. (всерос.) науч.-практ. конф. — Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2019. — С. 35–39.
- Морозов Н.П., Петухов С.А. Микроэлементы в промысловой ихтиофауне Мирового океана : моногр. — М. : Агропромиздат, 1986. — 160 с.
- Мур Дж.В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах: контроль и оценка влияния : моногр. — М. : Мир, 1987. — 285 с.

* EFSA Panel..., 2009.

Новиков М.А., Драганов Д.М. Комплексный методический подход к определению фоновых значений содержания микроэлементов в водных массах Баренцева моря на примере Cd, Co, Cu и Ni // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. — 2017. — № 2(34). — С. 37–48.

Хмельницкий Г.А., Локтионов В.Н., Полоз Д.Д. Ветеринарная токсикология : учеб. для вузов. — М. : Агропромиздат, 1987. — 320 с.

Чупикова Е.С., Ткаченко С.А., Борисенко Г.С. и др. Мониторинг показателей безопасности скумбрии японской // Актуальные проблемы биоразнообразия и природопользования : мат-лы 2-й Нац. науч.-практ. конф., посвящ. 20-летию кафедры экологии моря ФГБОУ ВО «КГМУ». — Симферополь : ИТ «Ариал», 2019. — С. 248–252.

Agah H., Leermakers M., Elskens M. et al. Accumulation of trace metals in the muscle and liver tissues of five fish species from the Persian Gulf // Environ Monit Assess. — 2009. — Vol. 157. — P. 499–514. DOI: 10.1007/s10661-008-0551-8.

Dopp E., Hartmann L.M., Florea A.-M. et al. Uptake of inorganic and organic derivatives of arsenic associated with induced cytotoxic and genotoxic effects in Chinese hamster ovary (CHO) cells // Toxicology Applied Pharmacology. — 2004. — Vol. 201, Iss. 2. — P. 156–165. DOI: 10.1016/j.taap.2004.05.017.

Edmonds J.S., Francesconi K.A., Cannon J.R. et al. Isolation, crystal structure and synthesis of arsenobetaine, the arsenical constituents of the western rock lobster *Panulirus longipes cygnus* George // Tetrahedron Letters. — 1977. — Vol. 18, Iss. 18. — P. 1543–1546. DOI: 10.1016/S0040-4039(01)93098-9.

Feldman J., Krupp E.M. Critical review or scientific opinion paper: Arsenosugars — a class of benign arsenic species or justification for developing partly speciated arsenic fractionation in foodstuffs? // Anal. Bioanal. Chem. — 2011. — Vol. 399. — P. 1735–1741. DOI: 10.1007/s00216-010-4303-6.

Frantzen S., Maage A., Duinker A. et al. A baseline study of metals in herring (*Clupea harengus*) from the Norwegian Sea, with focus on mercury, cadmium, arsenic and lead // Chemosphere. — 2015. — Vol. 127. — P. 164–170. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.01.037.

Geubel A.P., Mairlot M.C., Buchet J.P. et al. Abnormal methylation capacity in human liver cirrhosis // Int. J. Clin. Pharmacol. Res. — 1988. — Vol. 8(2). — P. 117–122.

Julshamn K., Frantzen S., Valdersnes S. et al. Concentrations of mercury, arsenic, cadmium and lead in Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) caught off the coast of northern Norway // Mar. Biol. Res. — 2011. — Vol. 7, Iss. 8. — P. 733–745. DOI: 10.1080/17451000.2011.594893.

Julshamn K., Lundebye A.-K., Heggstad K. et al. Norwegian monitoring programme on the inorganic and organic contaminants in fish caught in the Barents Sea, Norwegian Sea and North Sea, 1994–2001 // Food Addit. Contam. — 2004. — Vol. 21, Iss. 4. — P. 365–376. DOI: 10.1080/02652030310001639512.

Julshamn K., Nilsen B.M., Frantzen S. et al. Total and inorganic arsenic in fish samples from Norwegian waters // Food Addit. Contam. Part B: Surveillance. — 2012. — Vol. 5, Iss. 4. — P. 229–235. DOI: 10.1080/19393210.2012.698312.

Khairul I., Wang Q.Q., Jiang Y.H. et al. Metabolism, toxicity and anticancer activities of arsenic compounds // Oncotarget. — 2017. — Vol. 8, № 14. — P. 23905–23926. DOI: 10.18632/oncotarget.14733.

Li W., Wei C., Zhang C. et al. A survey of arsenic species in chinese seafood // Food Chem. Toxicol. — 2003. — Vol. 41, Iss. 8. — P. 1103–1110. DOI: 10.1016/s0278-6915(03)00063-2.

Marafante E., Vahter M., Envall J. The role of the methylation in the detoxication of arsenate in the rabbit // Chem. Biol. Interact. — 1985. — Vol. 56, Iss. 2–3. — P. 225–238. DOI: 10.1016/0009-2797(85)90008-0.

Neff J.M. Ecotoxicology of arsenic in the marine environment // Environ. Toxicol. Chem. — 1997. — Vol. 16, № 5. — P. 917–927. DOI: 10.1002/etc.5620160511.

Squibb K.S., Fowler B.A. The toxicity of arsenic and its compounds // Biological and environmental effects of arsenic. — Amsterdam : Elsevier, 1983. — P. 233–269.

Styblo M., Del Razo L.M., Vega L. et al. Comparative toxicity of trivalent and pentavalent inorganic and methylated arsenicals in rat and human cells // Arch. Toxicol. — 2000. — Vol. 74, Iss. 6. — P. 289–299. DOI: 10.1007/s002040000134.

The Barents Sea: Ecosystem, Resources, Management. Half a Century of Russian-Norwegian Cooperation / ed. by T. Jakobsen and V.K. Ozhigin. — Trondheim : Tapir Academic Press, 2011. — 825 p.

Zhang W., Chen L., Zhou Y. et al. Biotransformation of inorganic arsenic in a marine herbivorous fish *Siganus fuscescens* after dietborne exposure // Chemosphere. — 2016a. — Vol. 147. — P. 297–304. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.12.121.

Zhang W., Guo Z., Zhou Y. et al. Comparative contribution of trophic transfer and biotransformation on arsenobetaine bioaccumulation in two marine fish // Aquat. Toxicol. — 2016b. — Vol. 179. — P. 65–71. DOI: 10.1016/j.aquatox.2016.08.017.

Zhang W., Huang L., Wang W.-X. Biotransformation and detoxification of inorganic arsenic in a marine juvenile fish *Terapon jarbua* after waterborne and dietborne exposure // J. Hazard. Mater. — 2012. — Vol. 221–222. — P. 162–169. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.04.027.

References

- Albert, A.**, *Izбирatel'naya toksichnost'* (Selective Toxicity), vol. 1, Moscow: Medicina, 1989.
- Albert, A.**, *Izбирatel'naya toksichnost'* (Selective Toxicity), vol. 2, Moscow: Medicina, 1989.
- Baturin, G.N., Emel'yanov, E.M., and Stryuk, L.V.**, On the geochemistry of plankton and suspended solid sediments in the Baltic Sea, *Okeanologiya*, 1993, vol. 33, no. 1, pp. 126–132.
- Berestovskij, E.G.**, Diet and feeding behavior of American plaice *Hippoglossoides platessoides limantoides* in the Barents and Norwegian Seas, *Vopr. Ikhtiol.*, 1995, vol. 35, no. 1, pp. 94–104.
- Vinogradov, A.P.**, *Himicheskij elementarnyj sostav organizmov moray* (Elemental chemical composition of marine organisms), Moscow: Nauka, 2001.
- Emelyanov, E.M. and Kravtsov, V.A.**, Cause of elevated as concentrations in the Baltic Sea and Vistula lagoon, *Geohimiya*, 2007, no. 8, pp. 871–888.
- Zhizn' i usloviya yeye sushchestvovaniya v bentali Barentseva morya* (The life and its existence peculiarity in the Barents Sea benthal), Matishov, G.G., ed., Apatity: Kol. fil. KF MMBIAN SSSR, 1986.
- A study of ecosystems in fishery water areas, collection and processing of data on aquatic biological resources, and techniques and technology for their harvesting and processing**, in *Instruktsii i metodicheskie rekomendatsii po sboru i obrabotke biologicheskoi informatsii v moryakh Evropejskogo Severa i Severnoi Atlantiki* (Instructions and Methodical Recommendations for the Collection and Processing of Biological Information in the Seas of the European North and North Atlantic), Shevelev, M.S., ed., Moscow: VNIRO, 2004, 2nd ed., no. 1.
- Kovekovdova, L.T., Kiku, D.P., and Kasyanenko, I.S.**, Monitoring of the marine environment and safety of fishing grounds in the Far Eastern Fisheries Basin (toxic elements), in *Sb. mater. Vseross. nauchno-prakt. konf. mezhdunar. uchastiem, priuroch. k 145-letiyu Sevastopol. biol. stn. "Morskije biologicheskie issledovaniya: dostizheniya i perspektivy"* (Collect. Mater. All-Russ. Sci. Pract. Conf. Int. Participation, Commem. 145th Anniv. Sevastopol Biol. Stn. "Marine Biological Research: Achievements and Prospects"), Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2016, vol. 3, pp. 111–114.
- Lakin, G.F.**, *Biometriya* (Biometrics), Moscow: Vysshaya Shkola, 1990.
- Lapteva, A.M.**, Trace element composition of red king crab (*Paralithodes camtschaticus*) of the Barents Sea, in *Mater. 5 mezhdunar. nauchno-tech. konf. "Aktual'nye problemy osvoeniya biologicheskikh resursov Mirovogo okeana"* (Proc. 5th Int. Sci. Tech. Conf. "The Actual Problems of Development of Biological Resources of the World Ocean"), Vladivostok: Dal'rybvtuz, 2016, part 1, pp. 123–127.
- Lapteva, A.M. and Plotitsyna, N.F.**, Trace elements in bottom sediments of the Barents Sea on the standard section "Kola Meridian", *Vestn. Murm. Gos. Tekh. Univ.*, 2017, vol. 20, no. 1–2, pp. 242–251. doi 10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-242-251
- Lapteva, A.M. and Plotitsyna, N.F.**, Trace elements in the snow crab *Chionoecetes opilio* of the Barents Sea, in *Mater. 10 Nats. (Vseross.) nauchno-prakt. konf. "Prirodnye resursy, ikh sovremennoe sostoyanie, okhrana, promyslovoe i tekhnicheskoe ispol'zovanie"* (Proc. 10th Nat. All-Russ. Sci. Pract. Conf. "Natural Resources, Their Current Status, Conservation, and Commercial and Technical Use"), Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatskii Gos. Tekh. Univ., 2019, pp. 35–39.
- Morozov, N.P. and Petuhov, S.A.**, *Mikroelementy v promyslovoj ihtiofaune Mirovogo okeana* (Microelements in the commercial fish fauna of the World Ocean), Moscow: Agropromizdat, 1986.
- Mur, J.V. and Ramamurti, S.**, *Tyazhelye metally v prirodnykh vodah: kontrol' i oценка vliyaniya* (Heavy metals in natural waters: applied monitoring and impact assessment), Moscow: Mir, 1987.
- Novikov, M.A. and Draganov, D.M.**, Complex methodical approach to estimation of background levels of microelement content in watermasses of the Barents Sea (Cd, Co, Cu and Ni), *Bulletin of the Kamchatka Regional organization training and Scientific Center. Series: Earth sciences*, 2017, no. 2(34), pp. 37–48.
- Hmel'nickij, G.A., Loktionov, V.N., and Poloz, D.D.**, *Veterinarnaya toksikologiya* (Veterinary toxicology), Moscow: Agropromizdat, 1987.
- Chupikova, E.S., Tkachenko, S.A., Borisenko, G.S., Kovekovdova, L.T., and Popkov, A.A.**, Monitoring safety of Japanese mackerel, in *Mater. 2 Nats. nauchno-prakt. konf., posvyashch. 20-letiyu kafedry ekologii morya FGBOU VO "KGMTU" "Aktual'nye problemy bioraznoobraziya i prirodopol'zovaniya"* (Proc. 2th Nat. Sci. Prakt. Conf., dedicated 20th anniversary of the Department of Marine Ecology of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "KGMTU" "Actual problems of biodiversity and nature management"), Simferopol': IT "Ariel", 2019, pp. 248–252.
- Agah, H., Leermakers, M., Elskens, M., Rez-Fatemi, S.M., and Baeyens, W.**, Accumulation of trace metals in the muscle and liver tissues of five fish species from the Persian Gulf, *Environ Monit Assess*, 2009, vol. 157, pp. 499–514. doi 10.1007/s10661-008-0551-8
- Dopp, E., Hartmann, L.M., Florea, A.-M., von Recklinghausen, U., Pieper, R., Shokouhi, B., Shokouhi, B., Rettenmeier, A.W., Hirner, A.V., and Obe, G.**, Uptake of inorganic and organic derivatives

- of arsenic associated with induced cytotoxic and genotoxic effects in Chinese hamster ovary (CHO) cells, *Toxicology Applied Pharmacology*, 2004, vol. 201, no. 2, pp. 156–165. doi 10.1016/j.taap.2004.05.017
- Edmonds, J.S., Francesconi, K.A., Cannon, J.R., Raston, C.L., Skelton, B.W., and White, A.H.**, Isolation, crystal structure and synthesis of arsenobetaine, the arsenical constituents of the western rock lobster *Panulirus longipes cygnus* George, *Tetrahedron Letters*, 1977, vol. 18, no. 18, pp. 1543–1546. doi 10.1016/S0040-4039(01)93098-9
- Feldman, J. and Krupp, E.M.**, Critical review or scientific opinion paper: Arsenosugars — a class of benign arsenic species or justification for developing partly speciated arsenic fractionation in foodstuffs?, *Anal. Bioanal. Chem.*, 2011, vol. 399, pp. 1735–1741. doi 10.1007/s00216-010-4303-6
- Frantzen, S., Maage, A., Duinker, A., Julshamn, K., and Iversen S.A.**, A baseline study of metals in herring (*Clupea harengus*) from the Norwegian Sea, with focus on mercury, cadmium, arsenic and lead, *Chemosphere*, 2015, vol. 127, pp. 164–170. doi 10.1016/j.chemosphere.2015.01.037
- Geubel, A.P., Mairlot, M.C., Buchet, J.P., Dive, C., and Lauwerys, R.**, Abnormal methylation capacity in human liver cirrhosis, *Int. J. Clin. Pharmacol. Res.*, 1988, vol. 8, no. 2, pp. 117–122.
- Julshamn, K., Frantzen, S., Valdersnes, S., Nilsen, B.M., Maage, A., and Nedreaas, K.**, Concentrations of mercury, arsenic, cadmium and lead in Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) caught off the coast of northern Norway, *Mar. Biol. Res.*, 2011, vol. 7, no. 8, pp. 733–745. doi 10.1080/17451000.2011.594893
- Julshamn, K., Lundebye, A.-K., Heggstad, K., Berntssen, M.H.G., and Boe, B.**, Norwegian monitoring programme on the inorganic and organic contaminants in fish caught in the Barents Sea, Norwegian Sea and North Sea, 1994–2001, *Food Addit. Contam.*, 2004, vol. 21, no. 4, pp. 365–376. doi 10.1080/02652030310001639512
- Julshamn, K., Nilsen, B.M., Frantzen, S., Valdersnes, S., Maage, A., Nedreaas, K., and Sloth J.J.**, Total and inorganic arsenic in fish samples from Norwegian waters, *Food Addit. Contam. Part B: Surveillance*, 2012, vol. 5, no. 4, pp. 229–235. doi 10.1080/19393210.2012.698312
- Khairul, I., Wang, Q.Q., Jiang, Y.H., Wang, C., and Naranmandura, H.**, Metabolism, toxicity and anticancer activities of arsenic compounds, *Oncotarget*, 2017, vol. 8, no. 14, pp. 23905–23926. doi 10.18632/oncotarget.14733
- Li, W., Wei, C., Zhang, C., Van Hulle, M., Cornelis, R., and Zhang, X.**, A survey of arsenic species in chinese seafood, *Food Chem. Toxicol.*, 2003, vol. 41, no. 8, pp. 1103–1110. doi 10.1016/S0278-6915(03)00063-2
- Marafante, E., Vahter, M., and Envall, J.**, The role of the methylation in the detoxication of arsenate in the rabbit, *Chem. Biol. Interact.*, 1985, vol. 56, no. 2–3, pp. 225–238. doi 10.1016/0009-2797(85)90008-0
- Neff, J.M.**, Ecotoxicology of arsenic in the marine environment, *Environ. Toxicol. Chem.*, 1997, vol. 16, no. 5, pp. 917–927. doi 10.1002/etc.5620160511
- Squibb, K.S. and Fowler, B.A.**, The toxicity of arsenic and its compounds, *Biological and environmental effects of arsenic*, Amsterdam: Elsevier, 1983, pp. 233–269.
- Styblo, M., Del Razo, L.M., Vega, L., Germolec, D.R., LeCluyse E.L., Hamilton, G.A., Reed, W., Wang, C., Cullen, W.R., and Thomas, D.J.**, Comparative toxicity of trivalent and pentavalent inorganic and methylated arsenicals in rat and human cells, *Arch. Toxicol.*, 2000, vol. 74, no. 6, pp. 289–299. doi 10.1007/s002040000134
- The Barents Sea: Ecosystem, Resources, Management. Half a Century of Russian-Norwegian Cooperation**, Jakobsen, T. and Ozhigin, V.K., ed., Trondheim: Tapir Academic Press, 2011.
- Zhang, W., Chen, L., Zhou, Y., Wu, Y., and Zhang, L.**, Biotransformation of inorganic arsenic in a marine herbivorous fish *Siganus fuscescens* after dietborne exposure, *Chemosphere*, 2016, vol. 147, pp. 297–304. doi 10.1016/j.chemosphere.2015.12.121
- Zhang, W., Guo, Z., Zhou, Y., Chen, L., and Zhang, L.**, Comparative contribution of trophic transfer and biotransformation on arsenobetaine bioaccumulation in two marine fish, *Aquat. Toxicol.*, 2016, vol. 179, pp. 65–71. doi 10.1016/j.aquatox.2016.08.017
- Zhang, W., Huang, L., and Wang, W.-X.**, Biotransformation and detoxification of inorganic arsenic in a marine juvenile fish *Terapon jarbua* after waterborne and dietborne exposure, *J. Hazard. Mater.*, 2012, vol. 221–222, pp. 162–169. doi 10.1016/j.jhazmat.2012.04.027
- Evaluation of certain food additives and contaminants: 33rd Report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, *Tech. Rep. Ser. 776*, Geneva, 1989.
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM); Scientific Opinion on Arsenic in Food, *EFSA J.*, 2009, vol. 7, no. 10, 1351. doi 10.2903/j.efsa.2009.1351

Поступила в редакцию 28.06.2021 г.

После доработки 14.07.2021 г.

Принята к публикации 30.11.2021 г.