

Мониторинг стойких органических загрязнителей в промысловых рыбах Российской Арктики

© 2023. Ю. И. Варакина, аспирант, А. С. Аксёнов, к. т. н., профессор,
Д. Е. Лахманов, к. х. н., с. н. с., Т. Ю. Сорокина, к. ю. н., с. н. с.,
Л. Ф. Попова, д. б. н., профессор,

Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова,
163002, Россия, г. Архангельск, набережная Северной Двины, д. 17,
e-mail: yu.varakina@narfu.ru

В статье обсуждаются результаты анализа стойких органических загрязнителей (СОЗ) в промысловых видах рыб (атлантический лосось (сёмга) *Salmon salar*, азиатская корюшка *Osmerus dentex* Steindachner et Kner, сельдь *Clupea* sp., арктический голец *Salvelinus alpinus*), обитающих на территории Ненецкого автономного округа (НАО) и используемых в рационе питания жителями Российской Арктики. Данное исследование закладывает основу проведения мониторинга СОЗ в традиционных продуктах питания с учётом норм суточного потребления и возможных рисков, которые могут оказывать влияние на здоровье человека в Арктике. Авторы определили временные тренды содержания СОЗ в арктических видах рыб, а также провели анализ и сравнение опубликованных данных о СОЗ в традиционных пищевых продуктах Арктического региона. В исследуемых образцах рыб среди СОЗ доминировали p,p'-ДДЕ, ПХБ 153 и гексахлорбензол, что соответствует тенденциям накопления органических загрязнителей в арктических гидробионтах. Суммарное содержание СОЗ в сёмге, сельди, арктическом гольце и азиатской корюшке составляли 15,01; 7,89; 2,38; 2,02 нг/г сырого веса соответственно, что в десятки-сотни раз ниже установленных нормативных значений. Для всех изучаемых видов рыб, в количестве не менее 7 образцов, соотношение ДДЕ/ДДТ было высоким, что свидетельствует о раннем загрязнении ДДТ мест обитания рыб. Сёмга и сельдь являются наиболее загрязнёнными видами рыб по всему перечню изучаемых соединений. Отмечено снижение концентрации СОЗ в изучаемых видах рыб в сравнении с более ранними исследованиями, проведёнными на схожих территориях. Несмотря на большое количество рыбы в рационе жителей НАО, существенных рисков для здоровья населения выявлено не было. Однако было показано, что уровень ПХБ в концентрациях ниже предельно допустимых несёт потенциальный риск возникновения онкозаболеваний, особенно при потреблении сёмги более 45 г/сут местным населением в одном из посёлков НАО.

Ключевые слова: полихлорированные бифенилы, пестициды, промысловые виды рыб, Ненецкий автономный округ, Арктика, экологический риск.

Monitoring of persistent organic pollutants in commercial fish in the Russian Arctic

© 2023. Yu. I. Varakina ORCID: 0000-0002-7531-9193[†]

A. S. Aksenov ORCID: 0000-0003-1013-1357[†] D. E. Lakhmanov ORCID: 0000-0001-9940-4862[†]

T. Yu. Sorokina ORCID: 0000-0002-4873-8747[†] L. F. Popova ORCID: 0000-0003-1650-6797[†]

Northern (Arctic) Federal University Named after M. V. Lomonosov,
17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, Arkhangelsk, Russia, 163002,
e-mail: yu.varakina@narfu.ru

The manuscript discusses the results of the analysis of persistent organic pollutants (POPs) in commercial fish species (atlantic salmon *Salmo salar*, rainbow smelt *Osmerus dentex* Steindachner et Kner, herring *Clupea* sp., arctic char *Salvelinus alpinus*) living in the waters of the Nenets Autonomous Okrug (NAO) and used in the diet nutrition of the inhabitants of the Russian Arctic. This study lays the foundation for monitoring of POPs, taking into accounts the possible risks and norms of daily consumption of traditional foods that affect human health in the Arctic. The authors determined the temporal trends in the content of POPs in Arctic fish species, as well as analyzed and compared published data on the content of POPs in traditional food. In the studied fish samples, p,p'-DDE, PCB 153 and hexachlorobenzene dominated among POPs, which corresponds to the trends in the accumulation of organic pollutants in Arctic hydrobionts. The total content of POPs in atlantic salmon, herring, arctic char and rainbow smelt was 15,01; 7,89; 2,38; 2,02 ng/g wet weight, respectively, which is tens to hundreds times lower than the established standard values. For all fish species, in the amount of at least 7 samples, the DDE/DDT ratio was high, which indicates early DDT contamination of fish habitats. Atlantic salmon and herring are the most contaminated fish species in the entire list of studied

compounds. A decrease of POPs concentration in the studied fish species was noted in comparison with earlier studies conducted in similar areas. Despite the large amount of fish in the diet of peoples from the NAO, no significant risks have been identified. However, it was found that the level of PCBs in concentrations below the MPC carries a potential risk of cancer, especially with long-term consumption of atlantic salmon more than 45 g/day by the local population in one of the settlements of the NAO.

Keywords: polychlorinated biphenyls, pesticides, commercial fish species, Nenets Autonomous Okrug, Arctic, ecological risk.

С каждым годом всё большей антропогенной нагрузке подвергаются уникальные, хрупкие арктические территории. Негативному воздействию, прежде всего, подвержены биологические объекты [1, 2], следовательно, жизнь коренных народов и местного населения в Арктическом регионе находится под угрозой, так как значительная часть их рациона питания состоит из мигрирующих видов рыб и птиц, мяса и жира диких наземных и морских животных. Исследования показали, что до 80% высокотоксичных загрязнений поступает в результате употребления именно такой традиционной пищи [1, 2].

Отдельного изучения требуют глобальные загрязняющие вещества арктических пищевых цепей – стойкие органические загрязнители (СОЗ) [3–6]. Данные соединения активно использовались как синтетические ядовитые вещества в борьбе с вредителями и болезнями, в растениеводстве, а также в промышленности [7, 8]. Являясь суперэкоотоксикантами, они негативно влияют на здоровье человека и окружающую среду даже в тех регионах, где они никогда не производились, попадая туда посредством атмосферной циркуляции и трансграничного переноса [9–11].

Первые комплексные мониторинговые исследования СОЗ в Российской Арктике проводились в 2001–2004 гг. на территории Ненецкого (НАО) и Чукотского автономных округов, Кольского и Таймырского полуостровов [16]. После этого периода в литературе доступны только фрагментарные данные по содержанию СОЗ в различных видах традиционной пищи (рыба, птица, кит, тюлень, морж) населения Российской Арктики [12, 13].

Данное исследование является частью большого проекта, в рамках которого НАО был выбран в качестве пилотного региона для внедрения разработанной системы биомониторинга. Во-первых, вся его территория находится в Арктической зоне Российской Федерации (РФ). Во-вторых, в округе активно осуществляется добыча [14, 15]. В-третьих, мониторинговые исследования СОЗ в биологических объектах этого региона начались с 2000-х гг. В тот период основным районом ис-

следования в НАО был п. Нельмин-Нос [16]. Также в 1997–2008 гг. проводились исследования в бассейне реки Печора по выявлению проблем здоровья рыб в зависимости от уровня содержания СОЗ [17].

В 2017 г. в САФУ им. М.В. Ломоносова (г. Архангельск) создана лаборатория арктического биомониторинга, научным коллективом которой получен большой массив данных биологического мониторинга [18, 19], в том числе по содержанию СОЗ в арктических пищевых цепях [20–22].

На основе исследования продуктов питания среди населения семи сельских поселений региона ($n = 297$) было выявлено восемь приоритетных видов рыб следующих семейств: лососёвые Salmonidae (сёмга, горбуша, арктический голец, сиг-пыжьян), сельдевые Clupea (сельдь), тресковые Gadidae (навага), корюшковые Osmeridae (азиатская корюшка), щуковые Esocidae (щука), являющиеся основным источником питательных веществ [19]. Первые результаты были опубликованы по пяти наиболее потребляемым коренными и местными жителями п. Индига (НАО) видам рыб. Максимальные концентрации были выявлены у горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* и наваги *Eleginus nawaga* [20]. В настоящем исследовании представлены результаты по содержанию приоритетных СОЗ в мышечной ткани четырёх видов рыб: атлантический лосось (сёмга) *Salmon salar*, арктический голец *Salvelinus alpinus*, азиатская корюшка *Osmerus dentex* Steindachner et Kner, сельдь *Clupea* sp., которые дополняют и вносят новые, в том числе географические аспекты в предыдущие исследования.

Целью данного исследования было определение содержания СОЗ в промысловых видах рыб НАО и оценка их безопасности (риск здоровья человека) для жителей в случае длительного потребления в пищу.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в период с мая 2018 по сентябрь 2020 г. на территории НАО. В рамках полевых работ отбор проб рыб, как

продукта традиционного питания, осуществляли в Индигской губе Баренцева моря, в р. Печора (близ п. Красное) и у о. Колгуев (близ п. Бугрино) в Баренцевом море совместно с местным населением по утверждённым методикам (ГОСТ 7631-2008, ГОСТ 31339-2006). Было выловлено четыре вида рыб: атлантический лосось (сёмга) *Salmo salar*, азиатская корюшка *Osmerus dentex* Steindachner et Kner, сельдь *Clupea* sp. и арктический голец *Salvelinus alpinus*. Основной отбор проб проходил в Индигской губе Баренцева моря, где были выловлены все четыре вида рыбы. Дополнительно отбор был проведён ещё на двух участках, которые являются наиболее распространёнными местами обитания соответствующих видов рыб. Так, в р. Печора удалось отобрать сёмгу ($n = 2$), а вблизи п. Бугрино о. Колгуев – арктического гольца ($n = 5$). Единичные пробы из различных водных объектов были объединены в общую выборку в зависимости от вида рыб. После отлова каждый образец герметично упаковывали в пищевую плёнку и в замороженном состоянии транспортировали (ГОСТ 32366-2013) в лабораторию арктического биомониторинга САФУ (г. Архангельск). Для каждой особи был определён вид, пол, вес, длина по Смиту, возраст, влажность и общее содержание липидов согласно ГОСТ 1368-2003, ГОСТ 26829-86 и методиками, описанным в работе [20].

Определение содержания СОЗ осуществляли методом газовой хромато-масс-спектрометрии на приборе Agilent 7890А, оснащённом тройной квадрупольной системой MS/MS Agilent серии 7000 (США) в Центре коллективного пользования научным оборудованием «Арктика» САФУ и на базе научно-образовательного центра мирового уровня «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования» в мышечной ткани, как основного компонента, используемого в питании, по методике, описанной в работе [20]. Для анализа было выбрано 28 соединений из перечня, закреплённого Стокгольмской конвенцией о СОЗ 2001 г. [9]: 11 ПХБ (28, 52, 101, 105, 118, 123, 128, 138, 153, 180, 183) и 17 ХОП (α -гексахлорциклогексана (α -ГХЦГ), β -ГХЦГ, γ -гексахлорциклогексана (γ -ГХЦГ), p,p' -дихлордифенил-дихлорэтилена (p,p' -ДДЕ), o,p' -дихлордифенил-дихлорэтилена (o,p' -ДДЕ), p,p' -дихлордифенилтрихлорметилметана (p,p' -ДДД), o,p' -дихлордифенилтрихлорметилметана (o,p' -ДДД), ГХБ, цис-нонахлора, транс-нонахлора, цис-хлордана, транс-хлордана,

мирекса, альдрина 1,2,3,5-тетрахлорбензола (1,2,3,5-ТХБ), 1,2,4,5-тетрахлорбензола (1,2,4,5-ТХБ) и β -гептахлорэпоксида.

Особенности содержания исследуемых соединений в промысловых видах рыб НАО выявляли путём сравнения с данными, представленными в научной литературе [12, 16, 23], и с утверждёнными предельно допустимыми значениями, закреплёнными в российских нормативных документах СанПиН 2.3.2.1078-01, ТР ТС 021/2011 и ТР ЕАЭС 040/2016.

Для оценки риска здоровью человека при длительном потреблении исследуемых рыб использовали систему коэффициентов: коэффициент опасности для загрязняющего вещества (HQ) и коэффициент дополнительного риска возникновения рака в течение жизни ($ILCR$) для оценки экологического риска от СОЗ для человека при потреблении исследуемых видов рыб. Показатель HQ рассчитывали по формуле (1):

$$HQ = D_{\text{приёма пищи}} / TDI, \quad (1)$$

где HQ – коэффициент опасности (%), $D_{\text{приёма пищи}}$ – количество вещества токсиканта, попавшего в организм человека с пищей (мг/кг в день), TDI – коэффициент переносимого суточного потребления неканцерогенных веществ (мг/кг в день) [24].

Показатель доза приёма пищи $D_{\text{приёма пищи}}$ определяли по формуле (2) [24]:

$$D_{\text{приёма пищи}} = \left[\frac{C_{\text{в пище}} \cdot IR_{\text{пищи}} \cdot AFGIT \cdot N_{\text{дней}} \cdot N_{\text{лет}}}{m_{\text{рецептора}} \cdot 365 \cdot ОПЖ} \right], \quad (2)$$

где $D_{\text{приёма пищи}}$ – количество вещества (канцерогена или токсиканта), попавшего в организм человека с пищей (мг/кг в день), $C_{\text{в пище}}$ – максимальная концентрация загрязняющего вещества в продукте питания (мг/кг), $IR_{\text{пищи}}$ – скорость приёма пищи (кг в день), $AFGIT$ – коэффициент всасывания желудочного-кишечного тракта, равный 1, $N_{\text{дней}}$ – количество дней в году, в течение которых потребляется пища (0–365 дней), $N_{\text{лет}}$ – количество лет воздействия (не используется для неканцерогенных веществ), $m_{\text{рецептора}}$ – масса тела рецептора (кг), $ОПЖ$ – ожидаемая продолжительность жизни (в годах) (не используется для неканцерогенных веществ). Для НАО, согласно переписи населения, составляет 71,4 лет.

Показатель дополнительного риска возникновения рака в течение жизни ($ILCR$) определяли по формуле (3) [25]:

$$ILCR = D_{\text{приёма пищи}} \cdot Fr, \quad (3)$$

где $ILCR$ – показатель оценки дополнительного риска вероятности развития онкозаболевания при поступлении потенциального канцерогена в течение всей жизни, Fr – коэффициент наклона прямой (Slope Factor) для загрязняющих веществ (мг/(кг · день)).

Эксперименты проводили с использованием сертифицированного образца мышечной ткани рыб с известным содержанием СОЗ (IAEA-406, IAEA, Вена, Австрия). Обработку полученных данных осуществляли с применением пакета программного обеспечения SPSS, версия 23.0 (IBM Corp., Армонк, Нью-Йорк, США). Распределение числовых данных оценивали с помощью тестов Шапиро-Уилка. Все значения ниже предела количественного обнаружения (ПКО) принимали равными ПКО. Двухстороннее значение $p < 0,05$ считалось статистически значимым.

Результаты и обсуждение

В ходе количественного химического анализа содержания СОЗ в четырёх промысловых видах рыб, используемых в питании местными жителями НАО, были обнаружены 11 соединений ПХБ, 4 метаболита ДДТ, ГХБ и 9 хлорорганических пестицидов (ХОП). Во всей изученной выборке образцов мышечной ткани рыб содержание альдрина, β-гептахлорэпоксида, ПХБ 123 было ниже ПКО (табл. 1).

В РФ из большого перечня СОЗ в рыбной продукции, согласно действующим гигиеническим нормативам, регламентируется только три группы соединений: ΣПХБ, ΣДДТ и ΣГХЦГ. Их значения не должны превышать 2000; 300 и 200 нг/г сырого веса соответственно. Полученные уровни СОЗ в рыбах НАО являются низкими относительно утверждённых ПДК для трёх групп соединений.

Доминирующими СОЗ в анализированных образцах рыб были ПХБ, метаболиты ДДТ и ГХБ, что также было обнаружено в других подобных исследованиях [26]. Самыми распространёнными токсикантами в мышцах рыб являются ПХБ. Во всех исследуемых образцах средняя концентрация суммы 10 конгенов ПХБ находилась в диапазоне 1,10–4,92 нг/г сырого веса, при этом максимальное значение характерно для одного из образцов сёмги, где средний уровень ΣПХБ₁₀ составлял 10,05 нг/г сырого веса. Следует отметить, что данный уровень в 200 раз ниже нормативных значений ПДК. Минимальные концентрации ΣПХБ₁₀ при-

существовали в мышечной ткани арктического гольца и азиатской корюшки (менее 1,25 нг/г сырого веса).

В целом во всех изучаемых видах рыб присутствуют как маркерные ПХБ (153, 128, 138, 28, 101), так и диоксиноподобные соединения (ПХБ 118, 105). Данные группы соединений используются для оценки загрязнённости окружающей среды и биообъектов [27], которые являются соединениями антропогенного характера, входящими в состав технической смеси типа Aroclor (Совол – конденсаторное масло и Совтол – трансформаторное масло) [28]. Данная смесь до сих пор используется в России в качестве диэлектриков в трансформаторах и конденсаторах, в гидравлических системах, входит в состав смазочных и охлаждающих масел, лакокрасочных изделий для судов и т. д.

Доминирующим соединением для всех исследуемых образцов рыб был ПХБ 153 с максимальным уровнем содержания у сёмги (1,08 нг/г сырого веса), к такому же выводу пришли и учёные при исследовании рыб других территорий, таких как Азия, Африка, Западная Европа [20]. В сёмге, сельди и азиатской корюшке уровень содержания ПХБ 153 и ПХБ 138 был примерно одинаковый, и составил в среднем 1,05; 0,84 и 0,29 нг/г сырого веса в соответствие с таблицей 1. Для арктического гольца, наряду с высоким содержанием ПХБ 153, характерно доминирование ПХБ 128, что в 1,3–4,6 раза выше по сравнению с содержанием этого соединения в других видах рыб НАО. Другие конгены ПХБ в исследуемых образцах содержатся в меньших количествах.

В сельди, несмотря на низкое содержание липидов (от 0,71 до 1,30%) по сравнению с арктическим гольцом и азиатской корюшкой, уровень данных соединений в 3 раза выше. Сравнительный анализ полученного уровня СОЗ в лососёвых видах рыб с ранее опубликованными результатами [12] показывает, что концентрация конгенов ΣПХБ у рыб из НАО была в целом ниже, чем у рыб из Печенегского района в 2013 г.

Выявленные различия в уровнях содержания доминирующих ПХБ среди изучаемых видов рыб могут зависеть от биологических особенностей особей (видовое разнообразие, кормовая база, направленность метаболических процессов, места нагула и т. д.), а также от разной степени загрязнённости СОЗ разных звеньев пищевой цепи, что требует дополнительных исследований.

Таблица 1 / Table 1

Характеристика и результаты химического анализа промысловых видов рыб Ненецкого автономного округа (среднее значение, в скобках указан диапазон)
Characteristics and results of chemical analysis of commercial fish species of the Nenets Autonomous Okrug (average value, the range is indicated in parentheses)

| Параметр Parameter | Вид / Species | | | |
|---|--|---|---|--|
| | сёмга <i>Salmo salar</i> atlantic salmon | арктический голец <i>Salvelinus alpinus</i> arctic char | азиатская корюшка <i>Osmerus dentex</i> Steindachner et Kner rainbow smelt | сельдь <i>Clupea</i> sp. herring |
| Количество проб Number of samples | 7 | 15 | 15 | 11 |
| Возраст, годы Age, yearh | 4 (1,29–8,60) | 0,70 (0,47–1,05) | 0,10 (0,07–0,14) | 0,093 (0,08–0,10) |
| Вес, кг / Weight, kg | 3+ (1+–7+) | 4+ (3+–6+) | 6+ (4+–9) | 4+ (3+–4+) |
| Содержание липидов, % / Lipid, % | 5,57 (1,21–14,45) | 1,07 (0,05–3,30) | 1,29 (0,89–2,17) | 1,07 (0,71–1,30) |
| Полихлорированные бифенилы, нг/г сырого веса / Polychlorinated biphenyls, ng/g weit weight | | | | |
| ПХБ 28 / PCB 28 | 0,52 (0,05–1,00) | 0,11 (< ПКО–0,26) | 0,08 (< ПКО–0,16) | 0,33 (0,28–0,41) |
| ПХБ 52 / PCB 52 | 0,38 (0,03–0,87) | 0,06 (< ПКО–0,13) | 0,08 (< ПКО–0,12) | 0,23 (0,22–0,25) |
| ПХБ 101/ PCB 101 | 0,51 (< ПКО–1,22) | 0,16 (< ПКО–0,36) | 0,05 (< ПКО–0,14) | 0,48 (0,42–0,57) |
| ПХБ 105/ PCB 105 | 0,21 (0,03–0,47) | 0,03 (0,02–0,08) | 0,06 (0,02–0,13) | 0,21 (0,19–0,24) |
| ПХБ 118/ PCB 118 | 0,72 (0,05–1,58) | 0,13 (< ПКО–0,24) | 0,16 (< ПКО–0,35) | 0,57 (0,47–0,70) |
| ПХБ 128/ PCB 128 | 0,17 (0,03–0,37) | 0,23 (0,02–0,08) | 0,05 (0,01–0,10) | 0,13 (0,13–0,14) |
| ПХБ 138/ PCB 138 | 1,03 (0,21–2,12) | 0,05 (< ПКО–0,32) | 0,27 (0,03–0,56) | 0,84 (0,73–0,98) |
| ПХБ 153/ PCB 153 | 1,08 (0,24–2,16) | 0,43 (0,04–0,93) | 0,30 (0,03–0,58) | 0,85 (0,72–1,05) |
| ПХБ 180/ PCB 180 | 0,24 (0,07–0,44) | 0,03 (< ПКО–0,18) | 0,04 (< ПКО–0,09) | 0,16 (0,12–0,19) |
| ПХБ 183/ PCB 183 | 0,06 (0,01–0,11) | 0,01 (< ПКО–0,03) | 0,01 (< ПКО–0,03) | 0,04 (0,02–0,05) |
| Хлорорганические пестициды, нг/г сырого веса / Chlorineorganic pesticides, ng/g weit weight | | | | |
| p,p'-ДДЕ / p,p'-DDE | 2,19 (0,37–4,80) | 0,43 (< ПКО–0,94) | 0,20 (< ПКО–0,58) | 1,20 (1,01–1,53) |
| o,p'-ДДД / o,p'-DDD | 0,02 (< ПКО–0,05) | 0,02 (< ПКО–0,07) | – | – |
| p,p'-ДДД / p,p'-DDD | 0,8 (0,17–1,45) | 0,05 (< ПКО–0,19) | 0,05 (< ПКО–0,14) | 0,44 (0,41–0,49) |
| o,p'-ДДЕ / o,p'-DDE | 0,06 (< ПКО–0,17) | – | – | – |
| ГХБ / HCB | 3,08 (0,36–10,05) | 0,34 (0,04–0,85) | 0,56 (0,34–1,00) | 1,45 (1,18–1,75) |
| a-ГХЦГ / a-HCH | 0,09 (< ПКО–0,20) | – | – | – |
| b-ГХЦГ / b-HCH | 0,04 (< ПКО–0,14) | – | 0,01 (< ПКО–0,02) | 0,01 (0,01–0,01) |
| g-ГХЦГ / g-HCH | 0,03 (< ПКО–0,07) | – | 0,01 (< ПКО–0,01) | – |
| Цис-нонахлор Cis-Nonachlor | 0,56 (0,10–1,02) | 0,06 (0,02–0,12) | – | 0,30 (0,23–0,42) |
| Транс-нонахлор Trans-Nonachlor | 1,00 (0,17–2,57) | 0,11 (< ПКО–0,31) | 0,05 (< ПКО–0,13) | 0,55 (0,44–0,73) |
| Транс-хлордан Trans-Chlordane | 2,03 (0,34–3,67) | 0,04 (< ПКО–0,17) | – | 0,08 (< ПКО– 0,18) |
| Цис-хлордан Cis-Chlordane | – | 0,03 (< ПКО–0,09) | – | – |
| Мирекс / Mirex | 0,02 (0,01–0,06) | 0,04 (0,01–0,08) | 0,01 (ПКО–0,01) | 0,01 (0,01–0,03) |
| ΣТХБ / ΣTVX | – | 0,01 (ПКО–0,04) | – | – |

Примечание: ПКО – предел количественного обнаружения; «–» – нет сигнала.
Note: ПКО – limit of quantitation, “–” – no signal.

Второй группой соединений СОЗ, обнаруживаемой в мышцах исследуемых рыб, являются продукты распада ДДТ. У сёмги была выявлена самая высокая средняя концентрация Σ ДДТ (3,08 нг/г сырого веса), что, тем не менее, в 100 раз ниже ПДК для пресноводных видов рыб, в 65 раз ниже для морских видов рыб и в 649 раз ниже для жирных сортов рыб. Самая низкая концентрация этого вещества установлена в азиатской корюшке. Из четырёх исследуемых метаболитов ДДТ доминирующим соединением являлся р,р'-ДДЕ, который является основным остатком продукта распада ДДТ, что также наблюдалось в других подобных исследованиях рыб [12, 16, 17, 23]. В сёмге, арктическом гольце, азиатской корюшке и сельди концентрация р,р'-ДДЕ варьирует от 0,20 до 2,19 нг/г сырого веса. Суммарное содержание ДДТ в мышечной ткани сёмги и арктического гольца НАО было в 1,5–3,0 раза ниже, чем у тех же видов, представленных в исследовании в 2013 г. в бассейне Баренцева моря [12]. В азиатской корюшке была обнаружена самая низкая средняя концентрация р,р'-ДДЕ (0,2 нг/г сырого веса), она в 32 раза ниже, чем у видов рыб рода *Osmerus* [23]. В сёмге и сельди уровень этого анализа был в 1,5–3,0 раза выше по сравнению с уровнем основных соединений ПХБ. Кроме того, в исследованных образцах присутствовал р,р'-ДДД, но уровень его в анализированных образцах был в среднем в 2,7–8,0 раз ниже по сравнению с концентрацией р,р'-ДДЕ. р,р'-ДДЕ наряду с содержанием ПХБ 153 являются основными веществами из перечня СОЗ, особенно в арктическом гольце.

Оценить давность присутствия метаболитов ДДТ в местной фауне можно с использованием соотношения ДДЕ/ДДТ в организме животных. Так, если уровень р,р'-ДДЕ выше по отношению к р,р'-ДДТ, то загрязнения имеют давний характер [12]. В сёмге, арктическом гольце, азиатской корюшке и сельди соотношение данных метаболитов высокое, ввиду отсутствия соединения изомеров ДДТ в анализируемых пробах, что свидетельствует о раннем загрязнении соединением ДДТ водных объектов, где проводился отбор проб.

Наряду с ПХБ и метаболитами ДДТ, в мышечной ткани исследуемых образцов были обнаружены другие ХОП, такие как ГХБ, изомеры ГХЦГ, хлорданы, нонахлоры и мирекс. Гексахлорбензол был обнаружен во всех исследуемых образцах рыб в диапазоне от 0,34 (арктический голец) до 3,08 нг/г сырого веса (сёмга). Концентрация ГХБ в 1,1 раз

выше, чем в азиатской корюшке из Белого моря [23]. В арктическом гольце и сёмге уровень ГХБ был в 1,7–3,8 раза ниже по сравнению с литературными данными по Кольскому полуострову [12]. Однако в предыдущих наших исследованиях по изучению наваги, сига-пыжьяна, щуки и горбуши, обитающих в НАО, уровень ГХБ колебался от 0,13 до 0,40 нг/г сырого веса [20]. Вероятно, такие обнаруженные уровни ГХБ связаны не только с антропогенным характером этого соединения, загрязнёностью исследуемых водных объектов, но и с особенностями исследуемых видов (количество образцов рыб, физиологические параметры), а также методиками определения этого соединения в образцах.

Изомеры ГХЦГ имели относительно небольшой уровень накопления в рыбах водных объектов НАО. Максимальные средние концентрации обнаружены у сёмги (0,03–0,09 нг/г сырого веса), а самые низкие – в других исследуемых видах рыб (не более 0,01 нг/г сырого веса).

Соединения, относящиеся к группе хлорданы (цис-хлордан, транс-хлордан) и нонахлор (цис-нонахлор, транс-нонахлор), присутствовали во всех исследуемых образцах, их концентрация была ниже в 3,9–16,0 раз, чем в аналогичных видах рыб Кольского полуострова [12, 23]. Максимальная разница в видовой специфичности по сумме изомеров хлорданов и нонахлоров характерна для сёмги и сельди – в среднем 3,59 нг/г сырого веса, тогда как у арктического гольца и азиатской корюшки – 0,24 и 0,05 нг/г сырого веса соответственно.

Содержание мирекса в мышцах рыб варьировало от 0,05 до 0,13 нг/г сырого веса. Согласно проведённым ранее исследованиям, уровень этого соединения за последние 18 лет в промысловых видах рыб практически не изменился [16], что может указывать на его устойчивость к биоразложению в окружающей среде и отсутствие нового источника загрязнения.

Оценку географических различий уровней СОЗ в отдельных видах рыб проводили на примере сёмги и арктического гольца, обитающих в речных и морских системах НАО. На рисунке представлена карта распределения СОЗ в образцах рыб в зависимости от места отбора проб.

Результаты исследования показали, что уровни ПХБ, метаболитов ДДТ и ГХБ в образцах двух видов рыб различались в зависимости от места обитания. Сёмга, выловленная в бассейне р. Печора, имела более высокий суммарный уровень сравниваемых соеди-

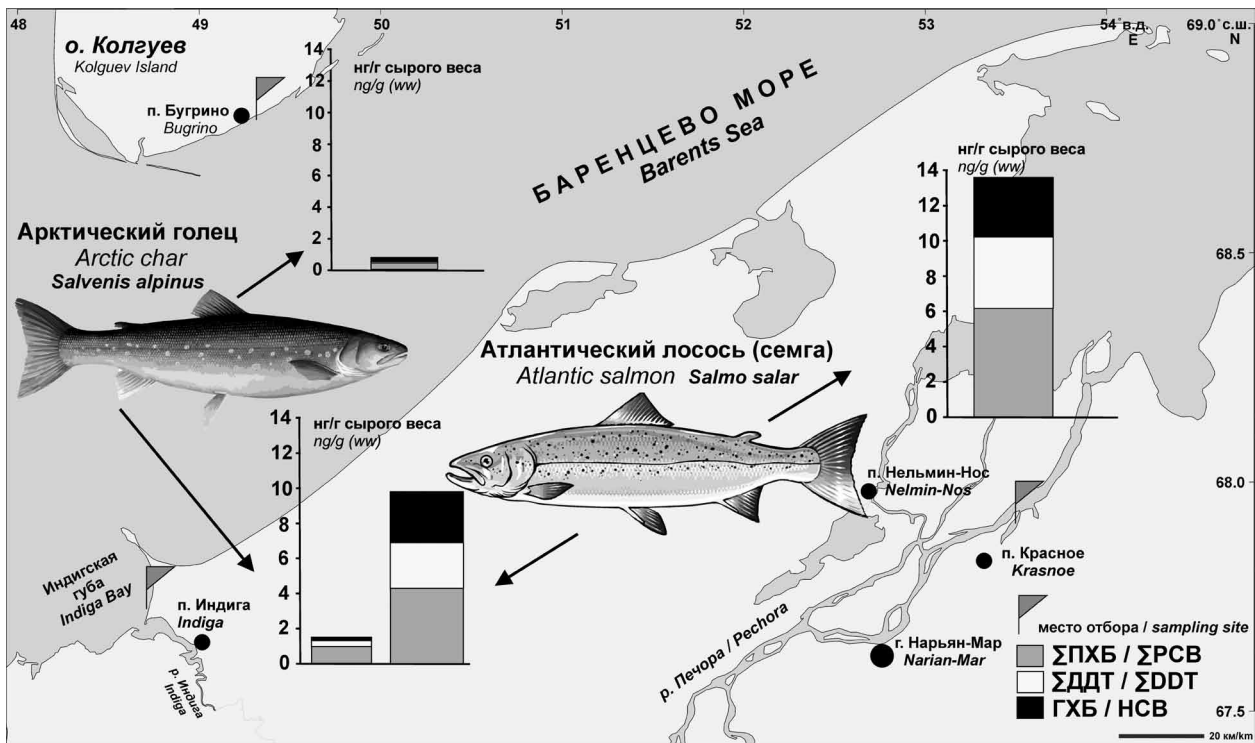


Рис. Места отбора и уровень ΣПХБ, ΣДДТ и ГХБ в промысловых видах рыб НАО
 Fig. Sampling sites and levels of ΣPCB, ΣDDT and HCB in commercial fish species of the NAO

ний (13,17 нг/г сырого веса) в отличие от рыбы того же вида из Индигского залива Баренцева моря (10,25 нг/г сырого веса). Однако максимальные значения ΣПХБ, ΣДДТ и ГХБ были зафиксированы в образцах из Индигского залива и соответственно равны 10,05; 6,30; 10,04 нг/г сырого веса, что в 1,5–3,5 раза выше по сравнению с образцами из р. Печоры. Следует отметить, что количество образцов в выборке реки и морского залива различалось, но данная информация имеет важное значение для мониторинговых исследований, так как достоверных данных по уровню СОЗ данных водоёмов в литературе не представлено.

Вероятнее всего высокий суммарный уровень СОЗ в рыбах бассейна реки Печоры связан с возрастными особенностями и содержанием липидов, так как возраст сёмги из р. Печоры в среднем составлял 6+ и содержание липидов 12,41%, в то время как в Индигском заливе данные показатели составляли 2+ и 2,83% соответственно.

Сравнение СОЗ в образцах рыб, обитающих в море и морском заливе, показало, что арктический голец Индигского залива характеризуется высоким содержанием ПХБ и ДДТ по сравнению с образцами рыб из Баренцева моря (близ п. Бугрино). Уровень ГХБ в сравниваемых образцах в зависимости

от места обитания был практически одинаковым и равен в среднем 0,34 нг/г сырого веса. В арктическом гольце, обитающем также, как и сёмга в Индигском заливе, обнаружены максимальные уровни ΣПХБ, ΣДДТ и ГХБ относительно другого места отбора. Таким образом, подобный анализ географических уровней СОЗ в особях одного и того же вида, но в отличающихся условиях обитания, позволяет выявить наиболее опасные участки загрязнения биоты в Арктике.

Как уже было отмечено выше, проведённое исследование показало, что мышечная ткань (филе) сёмги содержит наибольшие концентрации ряда СОЗ по сравнению с другими видами рыб, традиционно потребляемыми в пищу жителями Арктики. Ранее проведённые исследования подтверждают этот факт [12]. В связи с тем, что сёмга является одним из самых популярных видов рыбы среди местного населения НАО [19], нам видится оправданным и необходимым включение данного вида в качестве основного объекта в программу систематических биомониторинговых исследований на территории НАО.

Стоит отметить, что для корректного сравнения данных по СОЗ требуется как минимум 5–7 проанализированных особей. Данная информация получена впервые, и это крайне важно для дальнейшей оценки содержания

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты опасности и добавочного риска возникновения рака в течение жизни при воздействии основных СОЗ, обнаруженных в мышцах четырёх исследованных видов рыб, для жителей Ненецкого автономного округа
 Hazard coefficients and additional risk factors for the occurrence for cancer during life under the influence of the main POPs found in the muscles of the four studied fish species for residents of the Nenets Autonomous Okrug

| Соединения Compound | Коэффициенты экологического риска / Ecological risk ratios | | | |
|---|---|---|---|--|
| | суточная доза для коэффициента опасности (доза для HQ) Daily dose for hazard quotients (Dose for HQ) | коэффициент опасности (HQ) hazard Quotients (HQ) | суточная доза канцерогенной нагрузки (доза для ILCR) Daily dose of carcinogenic load (Dose for ILCR) | добавочный риск рака в течение жизни (ILCR) Incremental Lifetime Cancer Risk (ILCR) |
| Сёмга Индига / Salmon Indiga | | | | |
| ΣДДТ / ΣDDT | $4,2 \cdot 10^{-6}$ | $8,4 \cdot 10^{-3}$ | $4,2 \cdot 10^{-6}$ | $1,1 \cdot 10^{-6}$ |
| ΣПХБ / ΣPCB | $6,7 \cdot 10^{-6}$ | $5,1 \cdot 10^{-2}$ | $5,0 \cdot 10^{-6}$ | $1,0 \cdot 10^{-5*}$ |
| ГХБ / HCB | $6,7 \cdot 10^{-6}$ | $8,3 \cdot 10^{-3}$ | $5,0 \cdot 10^{-6}$ | $8,0 \cdot 10^{-6}$ |
| Сёмга Печора / Salmon Pechora | | | | |
| ΣДДТ / ΣDDT | $1,8 \cdot 10^{-7}$ | $3,6 \cdot 10^{-4}$ | $1,2 \cdot 10^{-6}$ | $4,1 \cdot 10^{-7}$ |
| ΣПХБ / ΣPCB | $2,8 \cdot 10^{-7}$ | $2,1 \cdot 10^{-3}$ | $1,8 \cdot 10^{-6}$ | $3,7 \cdot 10^{-6}$ |
| ГХБ / HCB | $1,4 \cdot 10^{-6}$ | $1,7 \cdot 10^{-3}$ | $9,2 \cdot 10^{-7}$ | $1,5 \cdot 10^{-6}$ |
| Арктический голец Индига / Arctic char Indiga | | | | |
| ΣДДТ / ΣDDT | $4,5 \cdot 10^{-7}$ | $9,0 \cdot 10^{-4}$ | $3,4 \cdot 10^{-7}$ | $1,2 \cdot 10^{-7}$ |
| ΣПХБ / ΣPCB | $1,0 \cdot 10^{-6}$ | $1,0 \cdot 10^{-2}$ | $7,5 \cdot 10^{-7}$ | $1,5 \cdot 10^{-6}$ |
| ГХБ / HCB | $3,5 \cdot 10^{-7}$ | $4,3 \cdot 10^{-4}$ | $2,6 \cdot 10^{-7}$ | $4,2 \cdot 10^{-7}$ |
| Арктический голец Бугрино / Arctic char Buginno | | | | |
| ΣДДТ / ΣDDT | $3,3 \cdot 10^{-7}$ | $6,6 \cdot 10^{-4}$ | $1,9 \cdot 10^{-7}$ | $6,6 \cdot 10^{-8}$ |
| ΣПХБ / ΣPCB | $4,0 \cdot 10^{-7}$ | $3,1 \cdot 10^{-3}$ | $2,4 \cdot 10^{-7}$ | $4,7 \cdot 10^{-7}$ |
| ГХБ / HCB | $2,3 \cdot 10^{-7}$ | $2,9 \cdot 10^{-4}$ | $1,3 \cdot 10^{-7}$ | $2,2 \cdot 10^{-7}$ |
| Азиатская корюшка / Rainbow smelt | | | | |
| ΣДДТ / ΣDDT | $5,3 \cdot 10^{-7}$ | $1,1 \cdot 10^{-3}$ | $3,7 \cdot 10^{-7}$ | $1,3 \cdot 10^{-7}$ |
| ΣПХБ / ΣPCB | $1,6 \cdot 10^{-6}$ | $1,3 \cdot 10^{-2}$ | $1,1 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$ |
| ГХБ / HCB | $7,3 \cdot 10^{-7}$ | $9,1 \cdot 10^{-4}$ | $5,1 \cdot 10^{-7}$ | $8,2 \cdot 10^{-7}$ |
| Сельдь / Herring | | | | |
| ΣДДТ / ΣDDT | $1,0 \cdot 10^{-6}$ | $2,0 \cdot 10^{-3}$ | $7,0 \cdot 10^{-7}$ | $2,4 \cdot 10^{-7}$ |
| ΣПХБ / ΣPCB | $2,3 \cdot 10^{-6}$ | $1,8 \cdot 10^{-2}$ | $1,6 \cdot 10^{-6}$ | $3,2 \cdot 10^{-6}$ |
| ГХБ / HCB | $8,7 \cdot 10^{-7}$ | $1,1 \cdot 10^{-3}$ | $6,1 \cdot 10^{-7}$ | $9,8 \cdot 10^{-7}$ |

Примечание: * – рассчитанный добавочный риск возникновения рака в течение жизни превышает $1 \cdot 10^{-5}$, что указывает на потенциальное существование риска рака.

Note: * – the calculated incremental lifetime cancer risk is greater than $1 \cdot 10^{-5}$ which indicates that a cancer risk potentially exists.

токсических веществ и расчёта рисков для здоровья населения Севера.

Стойкие органические загрязнители даже в концентрациях ниже ПДК за счёт процессов биоаккумуляции и биомagniфикации могут накапливаться в организме человека в течение всей жизни и очень медленно выводятся, и таким образом могут наносить вред здоровью [16]. В связи с этим, текущее содержание СОЗ в исследованных промысловых видах рыб не может свидетельствовать об отсутствии рисков для здоровья человека. Поэтому важно не

только сравнивать результаты химического анализа с имеющимися нормативами, но также учитывать популярность и длительность потребления конкретных видов местным населением.

В связи с вышесказанным нами было проведено анкетирование жителей трёх населённых пунктов, вблизи которых проводили отбор проб рыбы. Результаты данной работы были нами опубликованы ранее [19]. Анализ результатов анкетирования показал, что жители п. Индига НАО ежедневно потре-

бляют 47,12 г/сут сёмги, 28,93 г/сут арктического гольца, 49,6 г/сут азиатской корюшки и 33,93 г/сут сельди. В то время как люди, проживающие в п. Красное и п. Нельмин-Нос (расположены на р. Печора), потребляют в среднем 26,64 г/сут сёмги, а в п. Бугрино – 27,25 г/сут арктического гольца. Средний возраст участников исследования, проживающих в ранее упомянутых населённых пунктах, варьировал от 41,6 до 53,8 лет, вес – от 67,3 до 71,0 кг [21, 22].

Полученные значения коэффициентов экологического риска при потреблении местных продуктов питания жителями НАО приведены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, потенциальный риск для здоровья людей, употребляющих сёмгу из Индигского залива Баренцева моря, обусловлен максимальным содержанием Σ ПХБ₁₀ – 10,05 нг/г сырого веса. По остальным видам рыб полученные значения коэффициентов опасности и дополнительного риска возникновения рака в течение жизни были ниже пороговых значений ($HQ < 0,2$; $ILCR < 1 \cdot 10^{-5}$). Промысловые виды рыб вылова 2018–2022 гг. из трёх водных объектов НАО в целом безопасны, что отражает снижение уровня СОЗ по сравнению с ранее доступными данными в литературе [12, 16, 23]. Исключение составляет сёмга вылова 2018 г. (риск развития рака от Σ ПХБ₁₀).

Стоит отметить, что для расчётов использовали среднее суточное потребление рыбы жителями, проживающими в соответствующих населённых пунктах НАО. Вероятно, реального риска развития онкологии именно от СОЗ, содержащихся в сёмге, сельди, азиатской корюшке и арктическом гольце, нет. Однако полученные результаты указывают, что потенциальный риск возникновения онкологических заболеваний при потреблении промысловых видов рыб в данном регионе возможен. Это указывает на несовершенство текущих нормативных актов по безопасности рыбной продукции. Поэтому на основании актуальных уровней содержания СОЗ для рыбной продукции в научной литературе необходимо провести дополнительные исследования с целью обновления санитарно-гигиенических нормативов в области контроля безопасности пищевой продукции в отношении СОЗ с учётом кумулятивных рисков для здоровья человека.

Таким образом, из 28 исследованных соединений СОЗ в промысловых видах рыб НАО (сёмга, сельдь, арктический голец, азиатская корюшка) основными являются ПХБ 153, 138,

128, 118, p,p'-ДДЕ, ГХБ и соединения хлордана. Сёмгу и сельдь следует считать наиболее контаминированными видами рыб по всему перечню исследованных СОЗ. Наибольший уровень ПХБ 153, 138, 118, p,p'-ДДЕ и ГХБ обнаружен в сёмге и составил 1,08; 1,03; 0,72; 2,19; 3,08 и 3,59 нг/г сырого веса, что выше в 1,2–3,9 раза, чем в сельди. В остальных видах рыб присутствовали невысокие уровни концентраций других СОЗ, что связано с физиологическими и биохимическими параметрами (содержание жира, возраст и вес), а не только с условиями обитания этих организмов.

Заключение

Получены новые данные для мониторинговых исследований ПХБ и ХОП в промысловых видах рыб Арктического региона на примере трёх водоёмов НАО, расположенных близ п. Индига, п. Бугрино, п. Нельмин-Нос и п. Красное, где местные жители ведут традиционный образ жизни.

Доминирующими загрязнителями из перечня соединений Стокгольмской конвенции о СОЗ в мышцах исследуемых рыб являются p,p'-ДДЕ, ПХБ 153, 138, 128, 118 и ГХБ, содержание которых находится в пределах 0,04–3,08 нг/г сырого веса, что свидетельствует о давности поступления этих контаминантов в окружающую среду.

Установлено, что полученные уровни содержания Σ ДДТ, Σ ПХБ₁₀, Σ ГХЦГ в мышечной ткани рыб не превышают установленных ПДК. Средняя суммарная концентрация СОЗ у сёмги, сельди, арктического гольца, азиатской корюшки, находится в интервале 2,02–15,01 нг/г сырого веса.

Однако при суточном потреблении сёмги, обитающей в Индигском заливе Баренцева моря, как традиционного продукта питания более 45 г/сут, обнаружен потенциальный риск возникновения рака, связанный с поступлением ПХБ в организм человека. Полученные результаты составляют фундаментальные основы для развития концепции биомониторинга в Арктике и корректировки рациона питания жителей Севера с учётом содержания не только полезных и незаменимых нутриентов, но и токсичных соединений, которые могут нести потенциальный риск здоровью человека.

Настоящая работа была выполнена при финансовой поддержке Российского на-

учного фонда (договор от 22.03.2022 № 22-15-20076).

Литература

- Hjermitsev M., Long M., Wielsøe M., Bonefeld-Jørgensen E. Persistent organic pollutants in Greenlandic pregnant women and indices of foetal growth: The ACCEPT study // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 698. Article No. 134118.
- Long M., Knudsen A., Pedersen H., Bonefeld-Jørgensen E. Food intake and serum persistent organic pollutants in the Greenlandic pregnant women: The ACCEPT sub-study // *Science of the Total Environment*. 2015. V. 529. P. 198–212.
- AMAP, 1998. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Chapter 3: The Influence of Physical and Chemical Processes on Contaminant Transport. Oslo: AMAP, 1998. 859 p.
- De Wit C.A., Herzke D., Vorkamp K. Brominated flame retardants in the Arctic environment – Trends and new candidates // *Science of the Total Environment*. 2010. V. 408. P. 2885–2918.
- Braune B.M., Outridge P.M., Fisk A.T., Muir D.C.G., Helm P.A., Hobbs K., Hoekstra P.F., Kuzyk Z.A., Kwan M., Letcher R.J., Lockhart W.L., Norstrom R.J., Stern G.A., Stirling I. Persistent organic pollutants and mercury in marine biota of the Canadian Arctic: An overview of spatial and temporal trends // *Science of the Total Environment*. 2005. V. 351–352. P. 4–56.
- Hung H., Katsoyiannis A.A., Brorström-Lundén E., Olafsdottir K., Aas W., Breivik K., Bohlin-Nizzetto P., Sigurdsson A., Nakola H., Bossi R., Skov H., Sverko E., Barresi E., Fellin Ph., Wilson S. Temporal trends of Persistent Organic Pollutants (POPs) in arctic air: 20 years of monitoring under the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) // *Environmental Pollution*. 2016. V. 217. P. 52–61.
- Цыганков В.Ю. «Грязная дюжина» Стокгольмской конвенции. Химия и токсикология стойких органических загрязняющих веществ (СОЗ): обзор литературы // *Стойкие органические загрязняющие вещества (СОЗ) в Дальневосточном регионе: моря, организмы, человек / Под ред. В.Ю. Цыганкова. Владивосток: Изд-во Дальневосточного федерального университета, 2020. С. 12–61.*
- Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Стойкие хлороорганические пестициды в системе почва-поверхностная вода: концептуальный подход // *Теоретическая и прикладная экология*. 2008. № 1. С. 51–56.
- Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants Was Adopted on 22 May 2001 in Stockholm, Sweden [Электронный ресурс] <http://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/TheNewPOPs> (Дата обращения: 23.07.2022).
- Zapevalov M.A., Samsonov D.P., Kochetkov A.I., Pasyukova E.M., Bogacheva E.G. Global atmospheric transport of persistent organic pollutants to the Russian Arctic // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020. V. 45. P. 658–668.
- Wania F., MacKay D. Peer reviewed: tracking the distribution of persistent organic pollutants // *Environmental Science & Technology*. 1996. V. 30. P. 390A–396A.
- Дударев А.А., Душкина Е.В., Сладкова Ю.Н., Бурова Д.В., Гущин И.В., Талыкова Л.В., Никанов А.Н., Лукичева Л.А. Уровни экспозиции к стойким органическим загрязнителям (СОЗ) населения Печенгского района Мурманской области // *Токсикологический вестник*. 2016. № 3 (138). С. 2–9.
- Bravo N., Grimalt J.O., Chashchin M., Chashchin V., Odland J.Ø. Drivers of maternal accumulation of organohalogen pollutants in Arctic areas (Chukotka, Russia) and 4,4'-DDT effects on the newborns // *Environment International*. 2019. V. 124. P. 541–552.
- Walker T.R., Habeck J.O., Karjalainen T.P., Virtanen T., Solovieva N., Jones V., Kuhry P., Ponomarev V.I., Mikkola K., Nikula A., Patova E., Crittenden P.D., Young S.D., Ingold T. Perceived and measured levels of environmental pollution: interdisciplinary research in the subarctic lowlands of northeast European Russia // *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. 2006. V. 35. No. 5. P. 220–228.
- Государственный баланс запасов полезных ископаемых РФ на 1 января 2020 г.: ФГБУ «Росгеолфонд», Сборник сводных материалов о запасах общераспространённых полезных ископаемых РФ на 1 января 2020 г. [Электронный ресурс] <https://www.rfgf.ru/info-resursy/gosudarstvennyj-balans> (Дата обращения: 17.01.2022).
- AMAP, 2004. Persistent Toxic Substances, Food Security and Indigenous Peoples of the Russian North. Final Report. Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo: AMAP, 2004. 192 p.
- Lukin A., Sharova J., Belicheva L., Camus L. Assessment of fish health status in the Pechora River: Effects of contamination // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2011. V. 74. No. 3. P. 355–365.
- Sobolev N., Aksenov A., Sorokina T., Chashchin V., Ellingsen D., Nieboer E., Varakina Yu., Veselkina E., Kotsur D., Thomassen Y. Essential and non-essential trace elements in fish consumed by indigenous peoples of the European Russian Arctic // *Environmental Pollution*. 2019. V. 253. P. 966–973.
- Sobolev N., Nieboer E., Aksenov A., Sorokina T., Chashchin V., Ellingsen D., Varakina Yu., Plakhina E., Kotsur D., Kosheleva A., Thomassen Y., Sobolev N. Concentration dataset for 4 essential and 5 non-essential elements in fish collected in Arctic and sub-Arctic territories of the Nenets Autonomous and Arkhangelsk Regions of Russia // *Data in Brief*. 2019. V. 27. Article No. 104631.
- Lakhmanov D., Varakina Y., Aksenov A., Sorokina T., Sobolev N., Kotsur D., Plakhina E., Chashchin V., Thomassen Y. Persistent Organic Pollutants (POPs) in fish consumed by the indigenous peoples from Nenets Autonomous Okrug // *Environments*. 2020. V. 7. No. 1. Article No. 3.

21. Varakina Y., Lahmanov D., Aksenov A., Trofimova A., Korobitsyna R., Belova N., Sobolev N., Kotsur D., Sorokina T., Grjibovski A.M., Chashchin V., Thomassen Y. Concentrations of persistent organic pollutants in Women's Serum in the European Arctic Russia // *Toxics*. 2021. V. 9. Article No. 6.

22. Varakina Y., Aksenov A., Lahmanov D., Trofimova A., Korobitsyna R., Belova N., Kotsur D., Sorokina T., Grjibovski A.M., Popova L., Chashchin V., Odland J.Ø., Thomassen Y. Geographic and ethnic variations in serum concentrations of legacy persistent organic pollutants among men in the Nenets Autonomous Okrug, Arctic Russia // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. V. 19. No. 3. Article No. 1379.

23. Muir D., Savinova T., Savinov V., Alexeeva L., Potelov V., Svetochev V. Bioaccumulation of PCBs and chlorinated pesticides in seals, fishes and invertebrates from the White Sea, Russia // *Science of the Total Environment*. 2003. V. 306. P. 111–131.

24. Slope Factors (SF) for Carcinogens [Электронный ресурс] http://www.popstoolkit.com/tools/HHRA/SF_USEPA.aspx (Дата обращения: 28.02.2022).

25. Non-Carcinogen Tolerable Daily Intake (TDI) [Электронный ресурс] <http://www.popstoolkit.com/tools/HHRA/TDI> (Дата обращения: 28.02.2022).

26. Bonito L.T., Hamdoun A., Sandin S.A. Evaluation of the global impacts of mitigation on persistent, bioaccumulative and toxic pollutants in marine fish // *Peer Journals*. 2016. V. 4. Article No.1573.

27. Жаковская З.А., Петрова В.Н., Хорошко Л.О., Кухарева Г.И., Лукин А.А. Полихлорированные бифенилы и углеводороды в донных отложениях рек бассейна р. Печоры // *Водные ресурсы*. 2010. Т. 37. № 1. С. 75–83.

28. Кириченко В.Е., Первова М.Г., Промышленникова Е.П., Пашкевич К.И. Идентификация изомерных полихлорированных бифенилов в техническом продукте «Совол» // *Аналитика и контроль*. 2000. Т. 4. № 1. С. 41–44.

References

1. Hjermitsev M., Long M., Wielsøe M., Bonefeld-Jørgensen E. Persistent organic pollutants in Greenlandic pregnant women and indices of foetal growth: The ACCEPT study // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 698. Article No. 134118. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134118

2. Long M., Knudsen A., Pedersen H., Bonefeld-Jørgensen E. Food intake and serum persistent organic pollutants in the Greenlandic pregnant women: The ACCEPT sub-study // *Science of the Total Environment*. 2015. V. 529. P. 198–212. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.05.022

3. AMAP, 1998. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Chapter 3: The Influence of Physical and Chemical Processes on Contaminant Transport. Oslo: AMAP, 1998. 859 p.

4. De Wit C.A., Herzke D., Vorkamp K. Brominated flame retardants in the Arctic environment – Trends and new candidates // *Science of the Total Environment*. 2010. V. 408. P. 2885–2918. doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.08.037

5. Braune B.M., Outridge P.M., Fisk A.T., Muir D.C.G., Helm P.A., Hobbs K., Hoekstra P.F., Kuzyk Z.A., Kwan M., Letcher R.J., Lockhart W.L., Norstrom R.J., Stern G.A., Stirling I. Persistent organic pollutants and mercury in marine biota of the Canadian Arctic: An overview of spatial and temporal trends // *Science of the Total Environment*. 2005. V. 351–352. P. 4–56.

6. Hung H., Katsoyiannis A.A., Brorström-Lundén E., Olafsdottir K., Aas W., Breivik K., Bohlin-Nizzetto P., Sigurdsson A., Hakola H., Bossi R., Skov H., Sverko E., Barresi E., Fellin Ph., Wilson S. Temporal trends of Persistent Organic Pollutants (POPs) in arctic air: 20 years of monitoring under the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) // *Environmental Pollution*. 2016. V. 217. P. 52–61. doi: 10.1016/j.envpol.2016.01.079

7. Tsygankov V.Yu. “The Dirty Dozen” of the Stockholm Convention. Chemistry and toxicology of persistent organic pollutants (POPs): A review // *Persistent organic pollutants (POPs) in the Far Eastern Region: Seas, organisms, human* / Ed. V. Yu. Tsygankov. Vladivostok: Publishing House of the Far Eastern Federal University, 2020. P. 12–61 (in Russian).

8. Galiulin R.V., Galiulina R.A. Persistent organochlorine pesticides in the soil-surface water system: a conceptual approach // *Theoretical and Applied Ecology*. 2008. No. 1. P. 51–56 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2008-1-051-56

9. Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants Was Adopted on 22 May 2001 in Stockholm, Sweden [Internet resource] <http://chm.pops.int/TheConvention/ThePOPs/TheNewPOPs> (Accessed: 23.07.2022).

10. Zapevalov M.A., Samsonov D.P., Kochetkov A.I., Pasynkova E.M., Bogacheva E.G. Global atmospheric transport of persistent organic pollutants to the Russian Arctic // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020. V. 45. P. 658–668. doi: 10.3103/S1068373920090071

11. Wania F., MacKay D. Peer reviewed: tracking the distribution of persistent organic pollutants // *Environmental Science & Technology*. 1996. V. 30. P. 390A–396A. doi: 10.1021/es962399q

12. Dudarev A.A., Dushkina E.V., Sladkova Yu.N., Burova D.V., Gushchin I.V., Talykova L.V., Nikanov A.N., Lukicheva L.A. Exposure levels to persistent organic pollutants (POPs) of the population of the Pechenga district of the Murmansk Region // *Toxicological Bulletin*. 2016. V. 3 (138). P. 2–9 (in Russian). doi: 10.36946/0869-7922-2016-3-2-9

13. Bravo N., Grimalt J.O., M., Chashchin V., Odland J.Ø. Drivers of maternal accumulation of organohalogen pollutants in Arctic areas (Chukotka, Russia) and 4,4'-DDT effects on the newborns // *Environment*

- International. 2019. V. 124. P. 541–552. doi: 10.1016/j.envint.2019.01.049
14. Walker T.R., Habeck J.O., Karjalainen T.P., Virtanen T., Solovieva N., Jones V., Kuhry P., Ponomarev V.I., Mikkola K., Nikula A., Patova E., Crittenden P.D., Young S.D., Ingold T. Perceived and measured levels of environmental pollution: interdisciplinary research in the subarctic lowlands of northeast European Russia // *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. 2006. V. 35. No. 5. P. 220–228. doi: 10.1579/06-a-127r.1
15. State Balance of Mineral Reserves of the Russian Federation as of January 1, 2020: Federal State Budgetary Institution “Rosgeolfond”, Collection of summary materials on the reserves of common minerals of the Russian Federation as of January 1, 2020 [Internet resource] <https://www.rfgf.ru/info-resursy/gosudarstvennyj-balans> (Accessed: 17.01.2022) (in Russian).
16. AMAP, 2004. Persistent Toxic Substances, Food Security and Indigenous Peoples of the Russian North. Final Report. Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo: AMAP, 2004. 192 p.
17. Lukin A., Sharova J., Belicheva L., Camus L. Assessment of fish health status in the Pechora River: Effects of contamination // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2011. V. 74. No. 3. P. 355–365. doi: 10.1016/j.ecoenv.2010.10.022
18. Sobolev N., Aksenov A., Sorokina T., Chashchin V., Ellingsen D., Nieboer E., Varakina Yu., Veselkina E., Kotsur D., Thomassen Y. Essential and non-essential trace elements in fish consumed by indigenous peoples of the European Russian Arctic // *Environmental Pollution*. 2019. V. 253. P. 966–973. doi: 10.1016/j.envpol.2019.07.072
19. Sobolev N., Nieboer E., Aksenov A., Sorokina T., Chashchin V., Ellingsen D., Varakina Yu., Plakhina E., Kotsur D., Kosheleva A., Thomassen Y., Sobolev N. Concentration dataset for 4 essential and 5 non-essential elements in fish collected in Arctic and sub-Arctic territories of the Nenets Autonomous and Arkhangelsk Regions of Russia // *Data in Brief*. 2019. V. 27. Article No. 104631. doi: 10.1016/j.dib.2019.104631
20. Lakhmanov D., Varakina Y., Aksenov A., Sorokina T., Sobolev N., Kotsur D., Plakhina E., Chashchin V., Thomassen Y. Persistent Organic Pollutants (POPs) in fish consumed by the indigenous peoples from Nenets Autonomous Okrug // *Environments*. 2020. V. 7. No. 1. Article No. 3. doi: 10.3390/environments7010003
21. Varakina Y., Lahmanov D., Aksenov A., Trofimova A., Korobitsyna R., Belova N., Sobolev N., Kotsur D., Sorokina T., Grjibovski A.M., Chashchin V., Thomassen Y. Concentrations of persistent organic pollutants in Women’s Serum in the European Arctic Russia // *Toxics*. 2021. V. 9. Article No. 6. doi: 10.3390/toxics9010006
22. Varakina Y., Aksenov A., Lahmanov D., Trofimova A., Korobitsyna R., Belova N., Kotsur D., Sorokina T., Grjibovski A.M., Popova L., Chashchin V., Odland J.Ø., Thomassen Y. Geographic and ethnic variations in serum concentrations of legacy persistent organic pollutants among men in the Nenets Autonomous Okrug, Arctic Russia // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. V. 19. Article No. 1379. doi: 10.3390/ijerph19031379
23. Muir D., Savinova T., Savinov V., Alexeeva L., Potelov V., Svetochev V. Bioaccumulation of PCBs and chlorinated pesticides in seals, fishes and invertebrates from the White Sea, Russia // *Science of the Total Environment*. 2003. V. 306. P. 111–131.
24. Slope Factors (SF) for Carcinogens [Internet resource] http://www.popstoolkit.com/tools/HHRA/SF_USEPA.aspx (Accessed: 28.02.2022).
25. Non-Carcinogen Tolerable Daily Intake (TDI) [Internet resource] <http://www.popstoolkit.com/tools/HHRA/TDI> (Accessed: 28.02.2022).
26. Bonito L.T., Hamdoun A., Sandin S.A. Evaluation of the global impacts of mitigation on persistent, bioaccumulative and toxic pollutants in marine fish // *Peer Journals*. 2016. V. 4. Article No. 1573. doi: 10.7717/peerj.1573
27. Zhakovskaya Z.A., Petrova V.N., Khoroshko L.O., Kukhareva G.I., Lukin A.A. Polychlorinated biphenyls and hydrocarbons in bottom sediments of rivers in the Pechory // *Water resources*. 2010. V. 37. No. 1. P. 75–83 (in Russian).
28. Kirichenko V.E., Pervova M.G., Promyshlennikova E.P., Pashkevich K.I. Identification of isomeric polychlorinated biphenyls in the technical product “Sovol” // *Analytics and control*. 2000. V. 4. No. 1. P. 41–44 (in Russian).