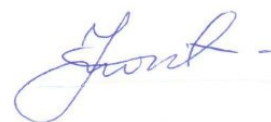


На правах рукописи



Варакина Юлия Игоревна

**СТОЙКИЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ ЗАГРЯЗНИТЕЛИ В ПРОМЫСЛОВЫХ
РЫБАХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ РИСК ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА В АРКТИКЕ
НА ПРИМЕРЕ НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА**

Специальность: 1.5.15 – Экология (биологические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Красноярск 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Архангельск)

Научный руководитель: **Попова Людмила Федоровна**, доктор биологических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Цыганков Василий Юрьевич**, доктор биологических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», факультет промышленных биотехнологий и биоинженерии, декан

Чуйко Григорий Михайлович, доктор биологических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук, лаборатория физиологии и токсикологии водных животных, заведующий

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»

Защита диссертации состоится «14» мая 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 99.0.036.02 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», по адресу: 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79, ауд. Р8-06.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и на сайте организации <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
канд. биол. наук



Л.А. Глущенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Арктический регион считается одной из немногих нетронутых экосистем, которая остается очень уязвимой к химическому загрязнению. В результате климатических изменений наблюдается усиленная мобилизация ранее накопленных соединений в объектах окружающей среды Арктики, а также происходит их перераспределение среди воды, донных отложений, снега и воздуха (АМАР, 2021; АМАР, 2020). К таким веществам относятся стойкие органические загрязнители (СОЗ), запрещенные к использованию на территории Российской Федерации с 2011 года и являющиеся токсичными соединениями для биологических объектов и человека. В России необходимость мониторинга СОЗ в окружающей среде и мониторинга состояния здоровья населения в связи с воздействием этих веществ, установлено Приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 03.10.2017 № 529 "Об утверждении Плана выполнения Российской Федерацией обязательств, предусмотренных Стокгольмской конвенцией о стойких органических загрязнителях". Изучение их распределения в Арктике имеет важное значение, так как данные вещества способны переноситься на большие расстояния, обладают свойствами биоаккумуляции и биомagnификации и тем самым, поступают в организм человека через пищевые цепи.

Продукты питания являются основными источниками поступления СОЗ для северных народов (Junqué et al., 2017; Bravo et al., 2019; Long et al., 2023). Из имеющихся в Арктике видов традиционной пищи, самым популярным является рыба (Мурашко и др., 2011; Дударев и др., 2016; Sobolev et al., 2020). В международной научной литературе представлено более 100 публикаций, посвященных результатам мониторинга СОЗ в арктической биоте. К сожалению, релевантные данные по морским и пресноводным рыбам арктических территорий России отражены только в 4-х наиболее значимых работах (Muir et al., 2003; АМАР, 2004; Дударев и др., 2015; Dudarev et al., 2019). Тем самым, исследования по содержанию органических токсикантов в гидробионтах затрагивают лишь малую часть видового разнообразия ихтиофауны арктических территорий, используемых в питании местным населением, что затрудняет оценку рисков связанных с воздействием СОЗ (АМАР, 2015; Rigét et al., 2019).

Уровень СОЗ в биологических средах человека так же изучен недостаточно полно, что отмечается в научных работах (Dudarev et al., 2019; Long et al., 2020). В Российской Арктике за последние 40 лет проведено несколько исследований по изучению СОЗ в биологических объектах как по северным регионам, так и внутри отдельного субъекта Российской Федерации. Большая часть работ, посвященных оценке уровней СОЗ в сыворотке крови человека, была проведена в 1990-е годы или начале 2000-х годов, результаты которых не позволяют судить ни о динамике процессов изменения, ни о текущем уровне СОЗ в организме человека (Dudarev et al., 2022). Результаты исследований биологических образцов показывают тенденцию снижения содержания основных групп СОЗ (полихлорированные бифенилы и хлорорганические пестициды) благодаря мерам, принятым как до, так и после принятия

Стокгольмской конвенции, но не указывают на возможный риск для человека, например, от потребления в пищу рыб. Однако исследователи на Дальнем Востоке РФ выявили, что возникает потенциальный риск для здоровья человека при потреблении лососёвых видов, несмотря на снижение уровня СОЗ в мышечной ткани этих рыб (Tsygankov et al., 2019).

В настоящее время недостаточно данных о комплексном изучении полихлорированных бифенилов (ПХБ) и хлорорганических пестицидов (ХОП) и связанных с ними рисков для человека в Российской Арктике (АМАР 2018; Porta, 2021; Polder, 2010; Abass 2018.). Имеющиеся научные труды показывают результаты только по ограниченным выборкам участников исследования и с небольшим перечнем видов рыб, птиц и млекопитающих, входящих в традиционный рацион питания жителей Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ).

В России системы мониторинга загрязнений окружающей природной среды основаны преимущественно на количественных измерениях содержания вредных веществ в ограниченном перечне объектов среды (атмосферный воздух, вода, почва). Такой подход не в полной мере отражает фактическую интенсивность токсичного воздействия на живые организмы и в первую очередь на человека. Для корректной оценки СОЗ в окружающей среде необходимо проведение комплексных мониторинговых исследований в системе «рыба–человек» с учетом приоритетных видов традиционной пищи и рисков влияния рациона питания на организм человека.

Цель и задачи исследования. Цель исследования – оценка экологического риска для человека в Арктической зоне Российской Федерации, связанного с поступлением в организм стойких органических загрязнителей с промысловыми видами рыб.

Для достижения этой цели определены следующие **задачи**:

1. Определить содержание и установить видовые различия в накоплении полихлорированных бифенилов и хлорорганических пестицидов у морских, пресноводных и проходных рыб, потребляемых жителями Ненецкого автономного округа.

2. Оценить уровень и географические различия содержания маркерных и диоксиноподобных полихлорированных бифенилов, гексахлорбензола, метаболитов ДДТ и других СОЗ в сыворотке крови мужчин и женщин семи поселков Ненецкого автономного округа.

3. Проанализировать уровень содержания СОЗ в пищевой цепи «рыба-человек» на примере арктического региона.

4. Рассчитать экологический риск от СОЗ для человека при использовании промысловых видов рыб в рационе питания жителей Ненецкого автономного округа.

Положения, выносимые на защиту:

1. В промысловых видах рыб Ненецкого автономного округа уровень содержания стойких органических загрязнителей находится в интервале 0,6...14,8 нг/г сырой массы и зависит от линейно-весовых показателей

гидробионтов, их возраста, содержания липидов в мышечной ткани и местообитания популяций.

2. Содержание ряда полихлорированных бифенилов и хлорорганических загрязнителей в биологических жидкостях населения, проживающего в островных и прибрежных населенных пунктах Ненецкого автономного округа, зависит как от количества потребляемой рыбы, так и ее принадлежности к соответствующей экологической группе (морская, пресноводная, анадромная и полуанадромная).

3. Потребление промысловых видов рыб жителями Арктической зоны Российской Федерации исключает риск опасности для здоровья человека с поступлением в организм стойких органических загрязнителей (ДДТ и ГХБ) по пищевой цепи.

Научная новизна. Установлены видовые различия в накоплении СОЗ промысловыми рыбами Ненецкого автономного округа, наибольший уровень ПХБ и ХОП обнаружен у сёмги (*Salmo salar* L.) и сельди (*Clupea sp.* L.) – 14,8 и 8,0 нг/г сырой массы, соответственно). Показано, что горбуша (*Oncorhynchus gorbuscha* W.) отличается максимальной долей *p,p'*-ДДЕ от общего содержания ксенобиотиков (41 %).

Впервые получены данные об уровнях содержания ПХБ и ХОП в сыворотке крови жителей (мужчин и женщин) семи поселков Ненецкого автономного округа с учетом влияния возрастной группы и локализации населенного пункта.

В ходе работы впервые рассчитан и оценен экологический риск при употреблении промысловых видов рыб для жителей западного сектора Российской Арктики.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные данные являются фундаментальной основой для проведения многолетних мониторинговых исследований на территории Российской Арктики. Результаты по оценке содержания СОЗ в гидробионтах и сыворотке крови человека Арктики дополняют базу данных об уровнях СОЗ в биологических образцах АЗРФ и являются основанием для принятия мер по обеспечению охраны окружающей среды и здоровья человека от воздействия органических токсикантов.

Результаты работы могут найти применение при разработке рекомендаций по химической безопасности и профилактике загрязнения среды обитания коренных жителей стойкими токсичными веществами, снижению экспозиции и, соответственно, риска их вредного воздействия на здоровье, при этом не нарушая образ жизни и культурные традиции жителей Арктики. Данный подход изучения токсикантов в системе «традиционная пища-человек» является универсальным для оценки экологических рисков, связанных с поступлением различных антропогенных веществ в окружающую среду и организм человека, и может быть применен для любого региона нашей страны.

Методология и методы исследований. В основу методологии эколого-биологического исследования положены работы Дударева А.А. (2009, 2010, 2012, 2014, 2015, 2016, 2019, 2022), Хурцилава, О.Г. (2017), Цыганкова В.Ю. (2015, 2016, 2017, 2019, 2022), Лукьяновой О.Н. (2016, 2018), Чашина В.П. (2017), Abass (2018), AMAP (2004, 2009, 2015, 2018), Bravo (2019), Deutch (2002, 2007), Long (2015, 2020), Muir (2003), Odland (2003), Petrenya (2011, 2012), Pavuk (2014), Polder (2010), Rylander (2011), Sandanger (2009).

При проведении работы были использованы три основные группы методов исследований: полевые – отбор образцов рыб, биоматериала человека и их пробоподготовка; лабораторные – химико-аналитические исследования проб мышечной ткани рыб, биоматериала человека; камеральные – обработка результатов анализов с применением статистического пакета обработки данных SPSS Statistics 21.

Личный вклад автора. Результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии в период с 2017 по 2021 гг. Автор участвовал в планировании и реализации экспедиционных работ, осуществлял отбор проб, разрабатывал и валидировал методики анализа, выполнял количественный анализ проб на современном химико-аналитическом оборудовании, а также принимал участие в постановке цели и задач исследования, обработке и интерпретировании полученных результатов исследования, подготовке научных публикаций.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов обеспечена применением современного, высокоточного физико-химического метода анализа – газовой хромато-масс-спектрометрии, обладающей хорошей воспроизводимостью и прослеживаемостью полученных экспериментальных данных относительно сертифицированных стандартных образцов исследуемых матриц в статистически значимых выборках. Работа выполнена на базе аккредитованных в национальной системе аккредитации испытательных лабораторий: лаборатории арктического биомониторинга (Аттестат аккредитации RA.RU.21HE19); центра коллективного пользования научным оборудованием «Арктика» (ЦКП НО «Арктика») (Аттестат аккредитации РОСС RU.0001.21AL65) САФУ имени М.В. Ломоносова. В исследовании использованы общепринятые методы отбора, обработки и анализа проб мышечной ткани рыб и сыворотки крови человека, все данные подверглись статистическому анализу, результаты исследования нашли отражение в статьях, прошедших рецензирование специалистами в области экологии.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались на международной конференции «Биомониторинг в Арктике» (г. Архангельск, в 2018 г., 2020 г., 2022 г.), международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019» (г. Севастополь в 2019 г. и 2021 г.), региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных по естественным наукам (г. Владивосток, 2021 г.) и на ежегодных конференциях САФУ имени М.В. Ломоносова в 2018-2021 гг.

Работа проведена **при финансовой поддержке** Правительства Российской Федерации в соответствии с постановлением № 220 от 09.04.2010 (*договор № 14.Y26.31.0009 от 14.03.2017*), Фонда содействия инновациям по программе «Умник» (*договор № 15432ГУ/2020 от 22.06.2020*), Российского научного фонда (*договор № 22-15-20076 от 22.03.2022*) и при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FSRU-2023-004".

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах, индексируемых в базах Web of Science, Scopus и рекомендуемых ВАК России для опубликования научных результатов, 1 патент и 9 материалов конференций и тезисов докладов.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту специальности 1.5.15 Экология (биологические науки). Полученные результаты и выводы в рамках диссертационного исследования соответствуют п. 10 «Антропогенное воздействие на популяции, сообщества и экосистемы; загрязнения среды токсичными веществами; биомониторинг» и п. 13 «Экология человека – биологические аспекты воздействия окружающей среды на человека (на уровне индивидуума и популяции)».

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 127 страницах машинописного текста, состоит из введения, трёх глав, заключения, выводов, списка 163 использованных литературных источников, включая 104 – иностранных и трёх приложений. Работа проиллюстрирована 21 рисунком, данные представлены в 14 таблицах.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю д.б.н., доценту, профессору кафедры химии и химической экологии САФУ Л.Ф. Поповой за участие в подготовке работы, всестороннюю поддержку и помощь на всех этапах работы; к.т.н., профессору кафедры биологии, экологии и биотехнологии САФУ А.С. Аксёнову за помощь при выполнении работы и обсуждении результатов. Автор выражает благодарность коллективу лаборатории арктического биомониторинга САФУ, к.х.н. Д.Е. Лахманову, доктору медицины (PhD) А.М. Гржибовскому, к.ю.н. Т.Ю. Сорокиной за помощь в сборе первичного материала, определении и анализе ряда физико-химических параметров, токсических соединений, консультации по статистической обработке и обсуждении результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Во введении обосновывается актуальность проведенных биомониторинговых исследований по выявлению СОЗ в биологических образцах Российской Арктики. Сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость работы.

ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В главе рассмотрена литература по соединениям, входящих в основной перечень Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях 2004 г.: маркерные и диоксиноподобные ПХБ, гексахлорбензол (ГХБ), метаболиты ДДТ и др., их физико-химические свойства, источники поступления в окружающую среду, закономерности распределения, а также уровни содержания в экосистемах Арктики. Больше внимание уделено накоплению изучаемых соединений в рыбах как звеньев пищевых цепей. Глава включает обзор научной информации о содержании ПХБ и ХОП в основных традиционных продуктах питания и биологическом материале населения, проживающего в Арктическом регионе; пути поступления токсикантов в организм человека и их негативное влияние на здоровье людей; проблемах экологического нормирования экотоксикантов в объектах окружающей среды. Показана также проблема систематизации данных уже проведенных исследований в Российской Арктике.

ГЛАВА 2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Протокол исследования был одобрен Комитетом по этике Северного государственного медицинского университета (выписка из протокола заседания Комитета по этике ГБОУ ВО «Северный государственный медицинский университет» № 06/09-17 от 27.09.2017). В рамках экспедиционных работ на территории Ненецкого автономного округа (Ненецкого АО) в период с 2018 по 2021 гг. было проведено анкетирование жителей семи сельских поселений: Бугрино, Варнек, Шойна, Индига, Амдерма, Красное и Нельмин-Нос – для выявления приоритетных видов продуктов традиционного питания. Отбор биологических образцов сыворотки крови человека проводился сотрудниками ГБУК НАО «Центральная районная поликлиника Заполярного района Ненецкого автономного округа» с последующей транспортировкой в лабораторию арктического биомониторинга САФУ. Также с помощью местного населения на территории Ненецкого АО было выловлено 8 видов гидробионтов, таких как атлантический лосось (сёмга) *Salmo salar* L. (n=7), арктический голец *Salvelinus alpinus* L. (n=15), горбуша *Oncorhynchus gorbuscha* W. (n=13), навага *Eleginus nawaga* W. (n=10), сиг *Coregonus lavaretus* L. (n=11), щука *Esox lucius* L. (n=8), азиатская корюшка *Osmerus dentex* Steindachner et Kner K. (n=15), сельдь *Clupea sp.* L. (n=11). В исследованиях были использованы образцы мышечной ткани промысловых видов рыб (n=90) и сыворотки крови человека (n=297).

В ходе анализа у каждого образца рыбы были определены линейно-весовые показатели (вес, длина тела), возраст, влажность, содержание липидов в мышечной ткани, согласно утвержденным методикам. В сыворотке крови человека дополнительно определяли холестерин и триглицериды, для пересчета концентраций.

Определение содержания СОЗ, а именно: ПХБ – 28, 52, 101, 105, 118, 123, 128, 153, 180, 183; α -гексахлорциклогексана (α -ГХЦГ), β -гексахлорциклогексана (β -ГХЦГ), γ -гексахлорциклогексана (γ -ГХЦГ), p,p' -дихлордифенилдихлорэтилена (p,p' -ДДЕ), o,p' -дихлордифенилдихлорэтилена (o,p' -ДДЕ), p,p' -дихлордифенилтрихлор-метилметана (p,p' -ДДД), o,p' -дихлордифенилтрихлор-метилметана (o,p' -ДДД), гексахлорбензола (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 в мышечной ткани рыб и сыворотке крови человека осуществляли методом газовой хромато-масс-спектрометрии на хроматографе Agilent 7890А с тройной квадрупольной системой MS/MS Agilent серии 7000 (США). Проверка контроля качества полученных результатов осуществлялась с использованием сертифицированных стандартных образцов (CRM) - SRM® 1958 (для сыворотки крови), IAEA-406 (для мышечной ткани рыб) (Lahmanov et al., 2020; Varakina et al., 2021). Экспериментальные исследования проводили на базе лаборатории арктического биомониторинга и Центра коллективного пользования научным оборудованием «Арктика» САФУ им. М.В. Ломоносова.

Статистическая обработка данных.

Обработку расчетов проводили в пакете прикладных программ Excel (Microsoft, США). Статистическая оценка данных проводилась с применением пакета программного обеспечения SPSS Statistics 21. (IBM Corp., Армунк, Нью-Йорк, США). с вычислением среднего арифметического, среднего геометрического ($M_{\text{геом.}}$), медианы, в качестве мер центральной тенденции, и вычислением стандартных отклонений и диапазона – в качестве мер изменчивости. Кроме того, 95% доверительные интервалы (ДИ) были рассчитаны для $M_{\text{геом.}}$. Распределение числовых данных оценивали с помощью тестов Шапиро-Уилка. Все значения ниже предела количественного обнаружения (ПКО) принимали равными $\frac{1}{2}$ ПКО. Учитывая, что большинство переменных были смещены вправо, для всех анализов применялись непараметрические статистические тесты. Для анализа различных условий использовались тесты Краскела-Уоллиса, а двумерные ассоциации оценивали с помощью тестов Манна-Уитни или одностороннего дисперсионного анализа (ANOVA) в зависимости от распределения.

Оценку экологического риска для здоровья жителей Ненецкого АО, связанного с потреблением рыбы, загрязненной ПХБ и ХОП, рассчитывали с применением системы коэффициентов: коэффициент опасности (HQ) и коэффициент дополнительного риска онкозаболеваний в течение всей жизни (ILCR) с использованием российских и зарубежных рекомендаций (Гелашвили и др., 2016; Health Canada Federal Contaminated ..., 2004) согласно указанным в анкетах частотам потребления, с учетом средней порции 150 г/сут, принятой ВОЗ (World Health Organisation ...). Средний вес людей в исследуемой выборке составил 71 кг, средний возраст 48 лет, продолжительность жизни 71,54 лет (Всероссийская перепись ..., 2010).

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обоснование выбора объектов исследования

Выявлены основные виды традиционной пищи, используемые в питании населением Ненецкого АО. В результате проведенного анкетирования местного населения установлено, что наибольшая доля (91 %) традиционного питания приходится на рыбу по сравнению с другими пищевыми категориями (олень, дикая птица, ягоды и грибы), что соответствует ранее проведенным исследованиям на этой территории (Petrenya et al., 2012). Было установлено, что жители семи населенных пунктов Ненецкого АО из всего многообразия арктической ихтиофауны в качестве продукта питания преимущественно используют 8 видов рыб (рисунок 1): анадромные (сёмга, горбуша, арктический голец, азиатская корюшка); полуанадромные (сиг); морские (навага, сельдь) и пресноводные (щука). Выявленные виды гидробионтов, с одной стороны, обладают высокой пищевой ценностью, с другой, – содержат различный уровень липидов, за счет которых могут накапливать СОЗ, как при непосредственном контакте со средой обитания, так и в результате процессов биомагнификации (Lakhmanov et al., 2020).

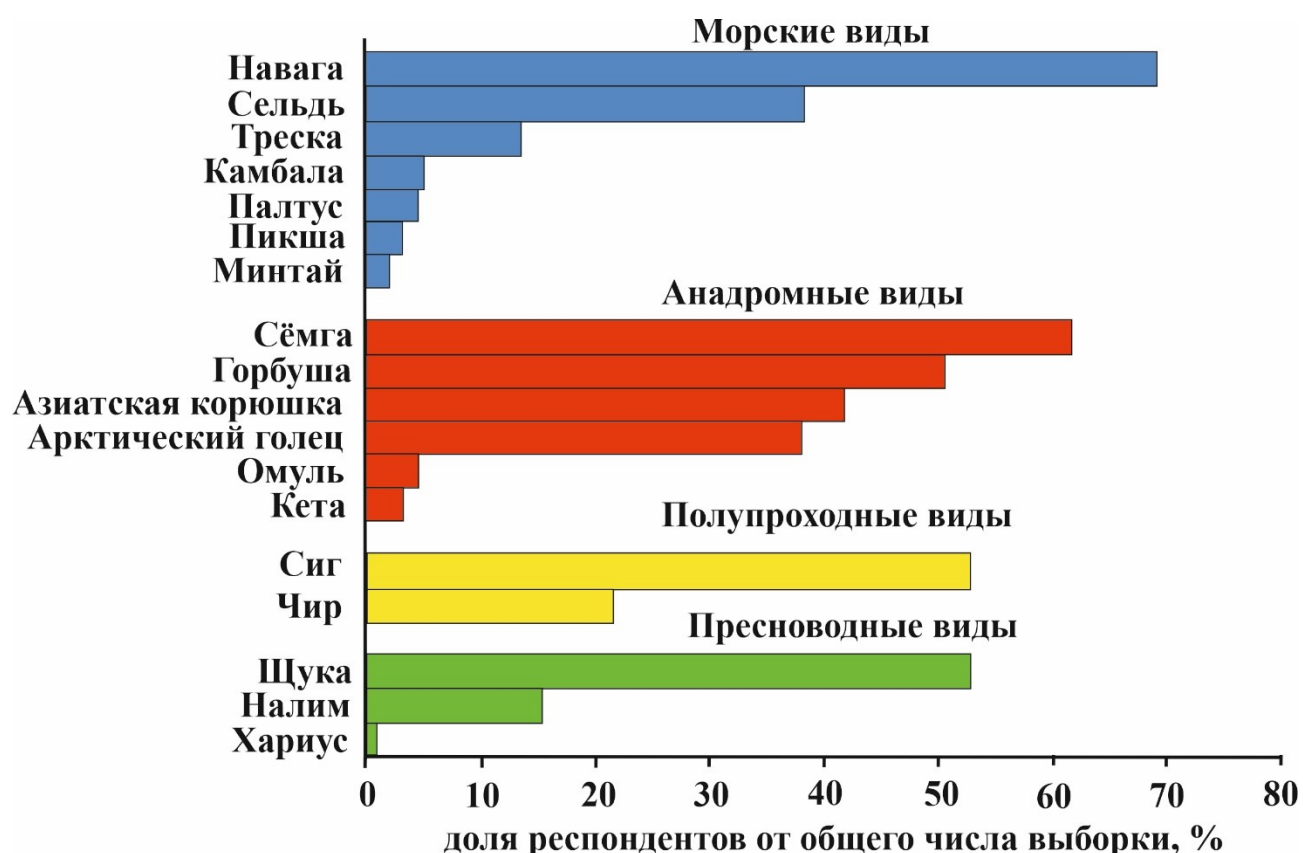


Рисунок 1 – Частота потребления промысловых видов рыб Ненецкого АО местным населением по результатам анкетирования

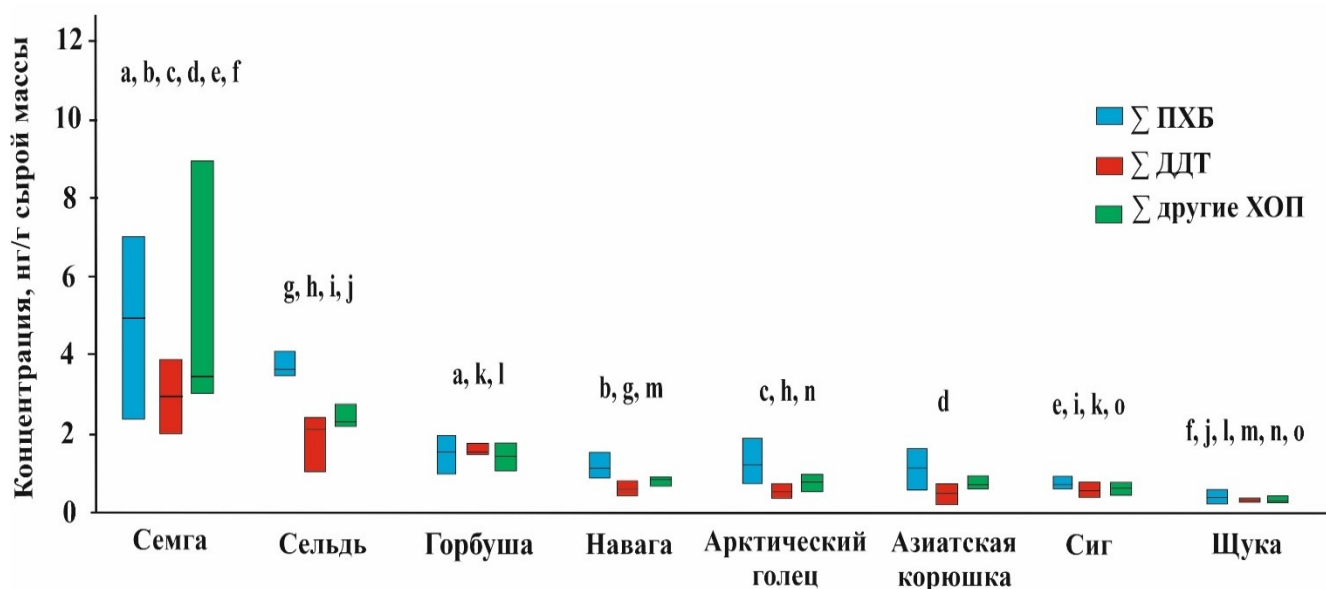
Стойкие органические загрязнители в рыбах АЗРФ

Содержание ПХБ и ХОП исследовали в 8 видах рыб следующих семейств: лососевые *Salmonidae* (сёмга, горбуша, арктический голец, сиг), сельдевые

Clupea (сельдь), тресковые *Gadidae* (навага), корюшковые *Osmeridae* (азиатская корюшка), щуковые *Esocidae* (щука), имеющих различия в модусах поведения и кормовой базе. Представители каждого вида были отобраны в количестве от 7 до 15 образцов, различающихся по возрасту, весу, длине и содержанию липидов, для получения более точной средней выборки.

Основной массив объектов исследования (82,2 %) был выловлен в Индигской губе Баренцева моря, остальные – в реке Печора близ пос. Красное (12,2 %) и у острова Колгуев (близ пос. Бугрино) в Баренцевом море (5,6 %).

Установлено, что наибольший уровень общего содержания СОЗ среди исследуемых видов рыб характерен для сёмги (14,8 нг/г сырой массы), а минимальный зафиксирован для щуки (0,6 нг/г сырой массы) (рисунок 2).



На рисунке показаны квартили [25 %; 75 %] и медиана. Для оценки значимости различий использован непараметрический критерий Манна-Уитни. Латинские буквы означают значимые различия суммарного содержания СОЗ между видами при $p \leq 0,01$.

Рисунок 2 – Уровни содержания основных групп СОЗ в мышечной ткани рыб Ненецкого АО, нг/г сырой массы

При рассмотрении содержания контаминантов по отдельным группам соединений были выявлены следующие СОЗ. Максимальная доля ДДТ характерна для горбуши (41 %), а содержание ХОП для сёмги. В других видах большая доля приходится на ПХБ. Полученные различия являются статистически значимы на уровне $p \leq 0,01$, согласно критерию Краскела-Уоллиса.

Из 28 исследованных соединений СОЗ в мышечной ткани промысловых видов рыб Ненецкого АО основными являются: ПХБ 153, 138, 128, 118, *p,p'*-ДДЕ, ГХБ и соединения хлордана (таблица 1), что согласуется с данными о доминирующих СОЗ в ранее проведенных исследованиях (АМАР, 2004; Muir et al, 2003).

Таблица 1 – Уровни содержания индивидуальных ПХБ и ХОП в мышечной ткани рыб

Соеди- нения	ПКО ¹	Средняя концентрация в мышцах рыб, нг/г сырой массы							
		Сёмга	Сельдь	Арктиче- ский голец	Азиатская корюшка	Горбуша	Навага	Сиг	Щука
Полихлорированные бифенилы									
ПХБ 28	0,007	0,52±0,14	0,33±0,01	0,11±0,02	0,08±0,03	0,07±0,02	0,07±0,02	0,12±0,03	0,10±0,02
ПХБ 52	0,003	0,38±0,11	0,23±0,01	0,06±0,01	0,08±0,02	0,10±0,01	0,03±0,01	0,07±0,01	0,02±0,01
ПХБ 101	0,013	0,51±0,16	0,48±0,05	0,16±0,04	0,05±0,03	0,15±0,03	0,08±0,01	0,03±0,01	-
ПХБ 105	0,010	0,21±0,06	0,21±0,02	0,03±0,001	0,06±0,02	0,03±0,01	- ²	-	-
ПХБ 118	0,016	0,72±0,20	0,57±0,07	0,13±0,02	0,16±0,06	0,19±0,03	0,14±0,02	-	-
ПХБ 128	0,007	0,17±0,04	0,13±0,01	0,24±0,06	0,05±0,02	0,48±0,08	0,24±0,07	-	0,15±0,06
ПХБ 138	0,003	1,03±0,25	0,84±0,07	0,05±0,02	0,27±0,09	-	-	-	-
ПХБ 153	0,013	1,08±0,26	0,85±0,10	0,43±0,07	0,30±0,10	0,41±0,06	0,68±0,11	0,51±0,08	-
ПХБ 180	0,007	0,24±0,05	0,16±0,02	0,03±0,01	0,04±0,01	-	-	-	-
ПХБ 183	0,004	0,06±0,01	0,04±0,01	-	0,01±0,001	-	-	-	-
Метаболиты ДДТ									
<i>p,p'</i> -ДДЕ	0,003	2,19±0,55	1,20±0,16	0,43±0,08	0,20±0,11	1,49±0,24	0,49±0,07	0,63±0,09	0,08±0,01
<i>p,p'</i> -ДДД	0,020	0,80±0,16	0,44±0,02	0,05±0,01	0,05±0,03	0,30±0,05	0,06±0,01	-	-
Другие хлорорганические пестициды									
ГХБ	0,010	3,08±1,25	1,45±0,16	0,34±0,05	0,56±0,12	0,39±0,05	0,39±0,05	0,28±0,09	0,13±0,03
транс- нонахлор	0,027	1,00±0,30	0,55±0,09	0,11±0,02	0,05±0,02	0,37±0,05	0,07±0,01	-	-
цис- нонахлор	0,040	0,56±0,05	0,30±0,02	0,06±0,01	-	0,16±0,02	0,08±0,03	-	-
транс- хлордан	0,013	2,03±0,51	0,08±0,05	0,04±0,01	-	0,10±0,01	0,03±0,001	-	-
цис- хлордан	0,013	-	-	0,03±0,01	-	0,16±0,02	0,04±0,01	-	-

Примечания – ¹предел количественного обнаружения; ²ниже предела количественного обнаружения.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что суммарное содержание ΣПХБ₁₀ и метаболитов ДДТ в мышцах исследованных рыб Ненецкого АО не превышало допустимые уровни, установленные санитарными правилами и нормативами РФ для рыб (2000 и от 200 до 300 нг/г сырой массы, соответственно) (СанПиН 1.2.3685-21). Однако, сёмгу и сельдь следует считать наиболее загрязненными рыбами среди изучаемых видов по всему перечню исследованных СОЗ, кроме ПХБ 128. Наибольший уровень ПХБ 153, 138, 118, *p,p'*-ДДЕ, ГХБ и ΣХлордан обнаружен в сёмге и составил 1,08; 1,03; 0,72; 2,19; 3,08 и 3,59 нг/г сырой массы соответственно, что выше в 1,2–3,9 чем в сельди. Горбуша, несмотря на короткий период жизненного цикла, характеризуется высоким уровнем *p,p'*-ДДЕ (1,49 нг/г сырой массы) и ПХБ 128 (0,48 нг/г сырой массы). В остальных видах рыб присутствовали невысокие уровни СОЗ, что может быть связано не только с условиями обитания этих организмов, но и с физиологическими и биохимическими параметрами образцов (содержание жира, возраст и вес) (Майстренко, В.Н., 2012; Ключев Н.А., 2012).

Факторы, влияющие на накоплении СОЗ в мышцах рыб

С помощью корреляционного анализа с использованием непараметрического критерия Спирмена было выявлено, что на биоаккумуляцию СОЗ в мышечной ткани рыб влияют линейно-весовые показатели гидробионтов и содержание липидов мышечной массы. Рыбы, являясь верхним трофическим уровнем водной экосистемы, аккумулируют органические токсиканты в своем организме в течение всего жизненного цикла (Heuvel et al., 2021; Munschy et al., 2020), что так же наблюдалось у сёмги и сига (рисунок 3).

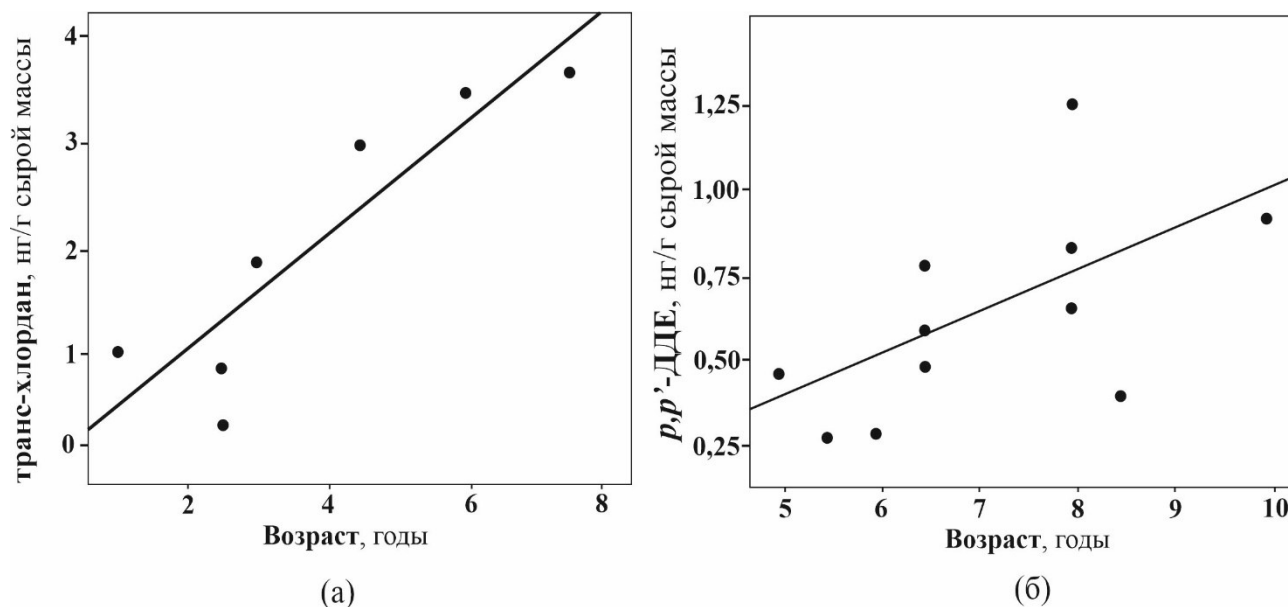


Рисунок 3 – Зависимость между концентрацией СОЗ и возрастом у исследованных видов рыб: а) для сёмги; б) для сига

Установлена очень высокая положительная связь между возрастом и содержанием ПХБ 28, ПХБ 52, ПХБ 101, ПХБ 138, p,p' -ДДЕ, транс-хлордана, цис-нонахлора и транс-нонахлора в сёмге, коэффициент корреляция (r_s) варьировал от 0,757 до 0,883 ($p < 0,01$ до 0,05). Для сига характерна высокая положительная связь между содержанием p,p' -ДДЕ, ПХБ 52 и возрастом ($r_s = 0,620$ и $r_s = 0,645$; $p < 0,01$ до 0,05).

Подобная картина так же прослеживается в выборке исследованных образцов при зависимости уровня содержания СОЗ от веса и длины тела особей, коэффициент корреляции Спирмена равен 0,975, при $p < 0,01$. При рассмотрении отдельных видов рыб статистическая значимая зависимость была выявлена только между содержанием транс-хлордана и весом сёмги (рисунок 4), что указывает на его накопление. Возможно, особи старших возрастов (крупные рыбы) подвергались воздействию транс-хлордана дольше, чем молодые (маленькие рыбы). В остальных видах рыб статистически значимых связей между концентрацией СОЗ и весом гидробионтов не было найдено, такие же результаты наблюдали и другие ученые (Cabrerizo et al., 2018).

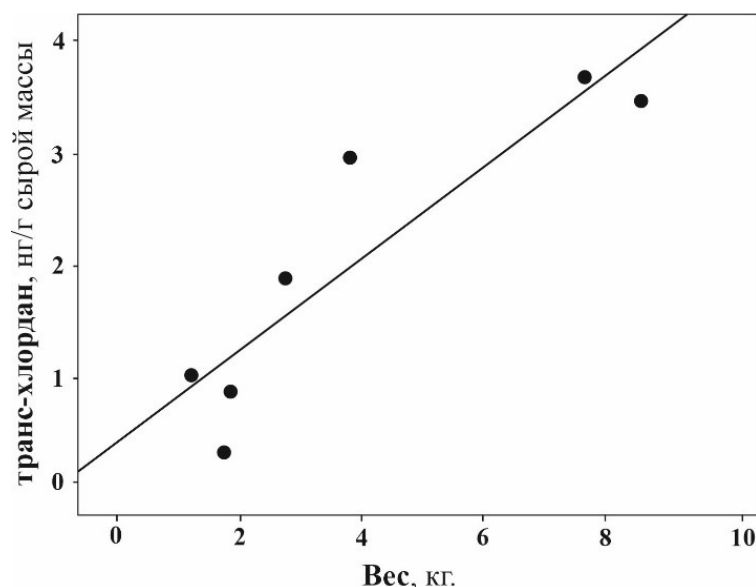


Рисунок 4 – Зависимость содержания транс-хлордана от веса сёмги ($r_s = 0,857$ при $p < 0,01$ до $0,05$)

Концентрация СОЗ так же зависит от длины тела рыб, что более наглядно наблюдалось у сёмги. Согласно коэффициенту корреляции (r_s от 0,786 до 0,857 при $p < 0,01$ до $0,05$.) содержание СОЗ, таких как ПХБ 52, ПХБ 101, ПХБ 138, p,p' -ДДЕ, цис-нонахлор и транс-нонахлор возрастает с увеличением длины тела особей.

Основным фактором накопления ПХБ и ХОП в мышечной ткани изучаемых рыб является содержание липидов, коэффициент корреляции Спирмена колеблется от 0,250 до 0,806 (при $p < 0,01$ до $0,05$). На рисунке 5 представлена наглядно зависимость содержания транс-нонахлора от содержания липидов.

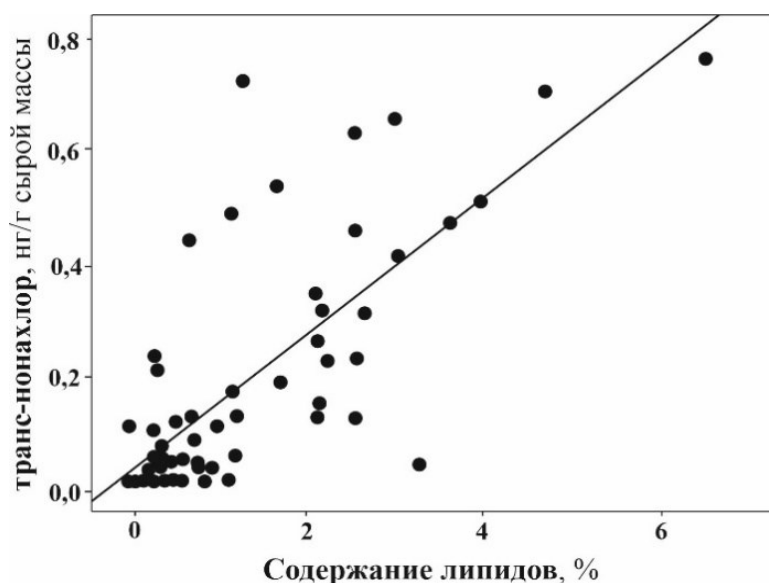
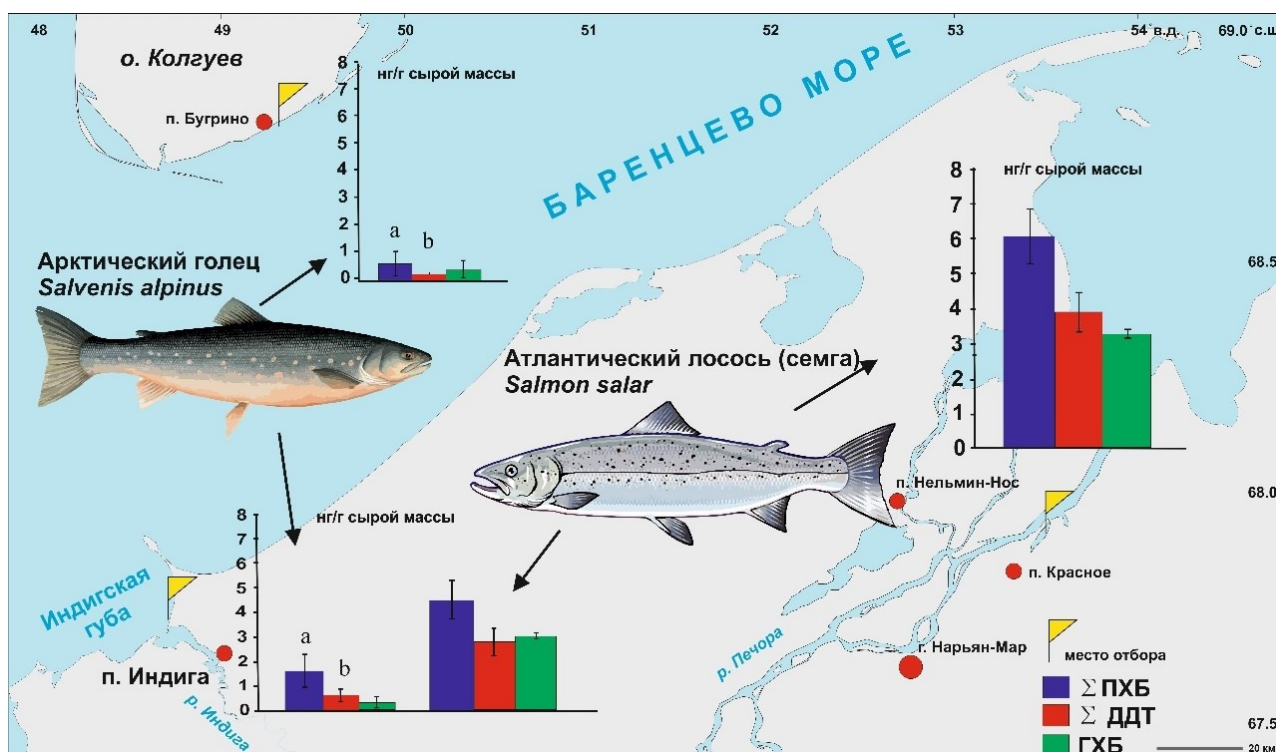


Рисунок 5 – Зависимость между концентрацией транс-нонахлора и содержанием липидов в мышцах исследованных образцов рыб ($r_s = 0,828$ при $p < 0,01$)

Установлено, что в горбуше накопление всех выявленных уровней СОЗ зависит от содержания жира (r_s от 0,553 до 0,698 при $p < 0,01$ до 0,05), что обусловлено особенностями быстрого роста особей за короткий жизненный цикл. Данный вид можно рассматривать как модельный объект ихтиофауны для токсикологических исследований в природных условиях Арктики, так как за небольшой период (1+) жизни условия окружающей среды изменяются одинаково для всех особей одного региона. Кроме того, с точки зрения повышения эффективности химической безопасности, горбушу предпочтительнее включать в питание определенным категориям жителей арктического региона (например, беременные и кормящие женщины), так как сёмга примерно того же возраста с одинаковым уровнем содержания липидов накапливает СОЗ больше, чем горбуша.

В ходе исследования, было изучено влияние района вылова в пределах Ненецкого АО на уровень СОЗ в рамках одного вида рыб, отобранных в разных водоемах Ненецкого АО. Полученные различия в уровнях содержания исследуемых СОЗ в арктическом гольце и сёмге в зависимости от места обитания, представлены на рисунке 6.



На рисунке показаны $M_{\text{геом}}$ концентрации и 95 % доверительный интервал для $M_{\text{геом}}$. Для оценки значимых различий использовали критерий Манна-Уитни. Латинские буквы означают значимые различия на уровне $p < 0,01$.

Рисунок 6 – Средняя геометрическая концентрация основных соединений СОЗ в зависимости от места обитания промысловых видов рыб Ненецкого АО

Результаты исследования показали, что сёмга, выловленная в бассейне р. Печора, имела более высокий суммарный уровень ПХБ, метаболитов ДДТ и ГХБ

в сравниваемых соединений (13,17 нг/г сырой массы) в отличие от рыбы того же вида из Индигской губы Баренцева моря (10,25 нг/г сырой массы). Однако, статистически значимые различия выявлены не были.

Сравнение СОЗ в образцах рыб, обитающих в море и морском заливе, показало, что уровень Σ ПХБ₁₀ и Σ ДДТ (0,98 и 0,47 нг/г сырой массы) в арктическом гольце Индигской губы Баренцева моря в 2 раза выше, чем в мышцах образцов, выловленных в районе о. Колгуев Баренцева море, что является статистически значимым. Уровень ГХБ в сравниваемых образцах был практически одинаковым, независимо от места обитания, и равен в среднем 0,34 нг/г сырой массы. Это может быть связано с выносом загрязняющих веществ путем речного стока в морские воды (Бортин и др., 2017).

Уровни содержания стойких органических загрязнителей в организме человека АЗРФ

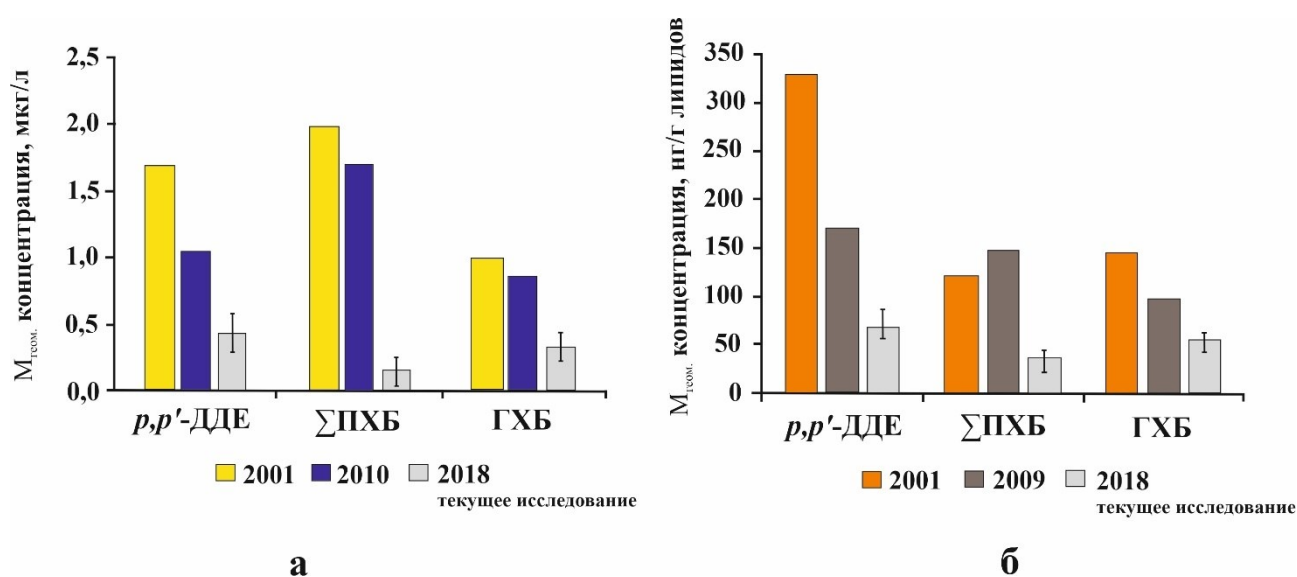
Впервые были установлены уровни содержания ПХБ и ХОП в сыворотке крови жителей (мужчин и женщин) семи поселков Ненецкого АО. Средние геометрические концентрации Σ ПХБ₅, Σ ДДТ, Σ другие ХОП составили 21,0; 95,7 и 69,3 нг/г липидов, соответственно. В таблице 2 показано, что доминирующими ксенобиотиками в сыворотке крови жителей исследуемого региона являются: *p,p'*-ДДЕ, ПХБ 153, ГХБ и β -ГХЦГ, что подтверждается ранее проведенными исследованиями среди жителей других арктических территорий (Long et al., 2015; Hjermitsev et al., 2019; Xu et al., 2022).

Таблица 2 – Содержание ПХБ и ХОП в сыворотке крови исследуемой популяции жителей Ненецкого АО

Соеди- нения	ПКО ¹ (нг/мл)	Концентрация, нг/мл крови				Концентрация, нг/г липидов крови			
		M _{геом.}	95 % ДИ	Me	Диапазон	M _{геом.}	95 % ДИ	Me	Диапазон
Метаболиты ДДТ									
o,p'-ДДЕ	0,020	0,08	0,07-0,09	0,11	<ПКО-3,97	12,6	10,8–14,7	16,5	<ПКО-597
p,p'-ДДЕ	0,107	0,44	0,38-0,51	0,41	<ПКО-12,5	73,0	63,6–83,8	69,9	<ПКО-2578
p,p'-ДДД	0,047	0,06	0,05-0,07	0,03	<ПКО1,08	10,1	8,77–11,7	5,04	<ПКО-194
Полихлорированные бифенилы									
ПХБ 118	0,080	<ПКО	- ²	<ПКО	<ПКО-1,43	<ПКО	-	<ПКО	<ПКО-184
ПХБ 138	0,093	<ПКО	-	<ПКО	<ПКО-4,17	<ПКО	-	<ПКО	<ПКО-811
ПХБ 153	0,025	0,10	0,08-0,12	0,12	<ПКО-14,8	16,7	13,9–20,0	21,1	<ПКО-2641
ПХБ 180	0,012	0,03	0,02-0,03	0,03	<ПКО-8,30	4,31	3,51–5,28	5,00	<ПКО-1423
ПХБ 183	0,054	<ПКО	-	<ПКО	<ПКО-0,18	<ПКО	-	<ПКО	<ПКО-48,5
Другие хлорорганические пестициды									
ГХБ	0,034	0,31	0,27-0,36	0,34	<ПКО-4,70	52,3	45,5–60,1	55,8	<ПКО-768
β-ГХЦГ	0,020	0,10	0,09-0,12	0,10	<ПКО-2,09	17,4	15,3–19,8	16,9	<ПКО-314
Альдрин	0,093	<ПКО	-	<ПКО	<ПКО-6,89	<ПКО	-	<ПКО	<ПКО-987
Мирекс	0,060	<ПКО	-	<ПКО	<ПКО-0,71	<ПКО	-	<ПКО	<ПКО-111
транс- Нонахлор	0,086	<ПКО	-	<ПКО	<ПКО-0,87	<ПКО	-	<ПКО	<ПКО-132
1,2,3,5- ГХБ	0,011	0,011	0,01-0,01	<ПКО	<ПКО-2,25	1,83	1,50–2,23	<ПКО	<ПКО-502

Примечания – ¹предел количественного обнаружения; ²для среднее геометрического значения 95% ДИ не рассчитывался, так как значение было <ПКО.

При сравнении полученных результатов настоящего исследования, в 2018 году, с ранее опубликованными, можно отметить, что концентрации большинства СОЗ в сыворотке человека за последние десятилетия снизились (Abass et al., 2018; Dudarev et al., 2010). Более ранние данные о концентрации отдельных СОЗ в сыворотке крови человека имеются только в отношении жителей пос. Нельмин-Нос европейской части Российской Арктики (Варакина и др., 2023; Dudarev et al, 2022). Сравнительный анализ этих данных с данными полученными в ходе настоящего исследования в отношении представителей одинаковых возрастных групп, показал четкую тенденцию к снижению сывороточных концентраций *p,p'*-ДДЕ, Σ ПХБ, ГХБ с 2002 по 2009 год и далее до 2018 года (рисунок 7), что также проявляется и у жителей других арктических стран (Long et al, 2021; Bjerregaard et al, 2007; Eik Anda et al, 2007; Hjermitsev et al, 2019).



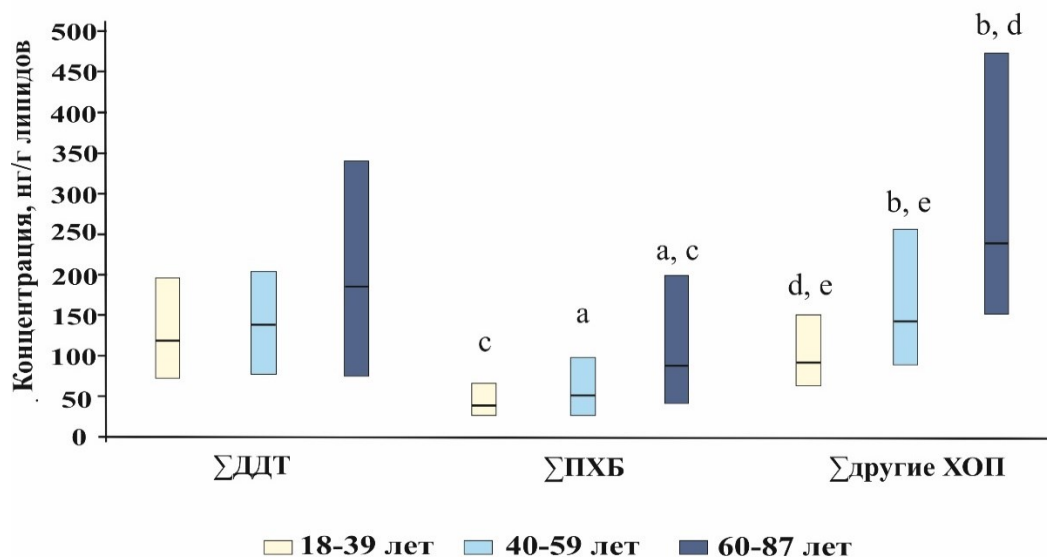
а) Хурцилава и др., 2017;
б) Rylander et al., 2011; AMAP, 2009; Sandanger et al., 2009.

Рисунок 7 – Сравнение содержания отдельных СОЗ (среднее геометрическое) в сыворотке крови жителей Ненецкого АО (2018 год) с данными ранее проведенных исследований.

Такое распределение сывороточных концентраций в крови человека может быть связано принятием в 2004 году Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях, направленной на ликвидацию или ограничение производства и использования СОЗ (Sorokina, 2018). Однако, замена традиционного питания переработанными пищевыми продуктами, в том числе импортными, также могла способствовать наблюдаемой тенденции к снижению концентраций СОЗ в арктической части России (AMAP, 2021).

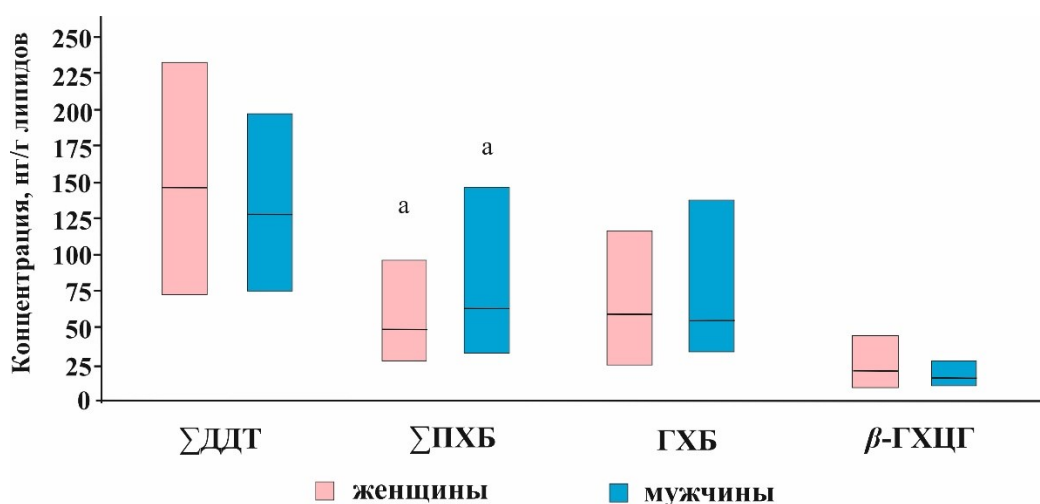
Основными факторами, влияющими на накопление СОЗ, являются возраст, ИМТ, среда обитания и питание (Zani et al., 2019; Singh et al., 2018; Pavuk et al., 2014). Наибольшие уровни содержания СОЗ характерны для лиц 60 лет и старше (рисунок 8). У мужчин отмечены более высокие концентрации ПХБ, чем

у женщин (рисунок 9). Вероятно, высокие уровни СОЗ у мужчин связаны с потреблением ими большого количества мяса и рыбы, а также способности женского организма частично выводить жирорастворимые вещества. Такие же различия в уровне содержания Σ ДДТ, Σ ПХБ, ГХБ и β – ГХЦГ в зависимости от пола были ранее установлены в работах (Хурцилава и др., 2017; Sandanger et al., 2009).



На рисунке показаны квартили [25%; 75%] и медиана. Для оценки значимости различий использован непараметрический критерий Манна-Уитни. Латинские буквы означают значимые различия между группами при $p \leq 0,001$.

Рисунок 8 – Концентрация основных групп СОЗ в сыворотке крови в зависимости от возраста жителей Ненецкого АО



На рисунке показаны квартили [25%; 75%] и медиана. Для оценки значимости различий использован непараметрический критерий Манна-Уитни. Латинские буквы означают значимые различия между группами при $p \leq 0,05$.

Рисунок 9 – Содержание основных СОЗ в сыворотке крови женщин и мужчин Ненецкого АО

Наряду с изученными факторами, влияющими на содержание СОЗ в сыворотке крови человека были выявлены географические различия, как и в других подобных работах (Long et al, 2021; Long et al, 2015). На рисунке 10 представлены результаты анализа содержания идентифицированных групп СОЗ в биологических образцах жителей Ненецкого АО в зависимости от места проживания.

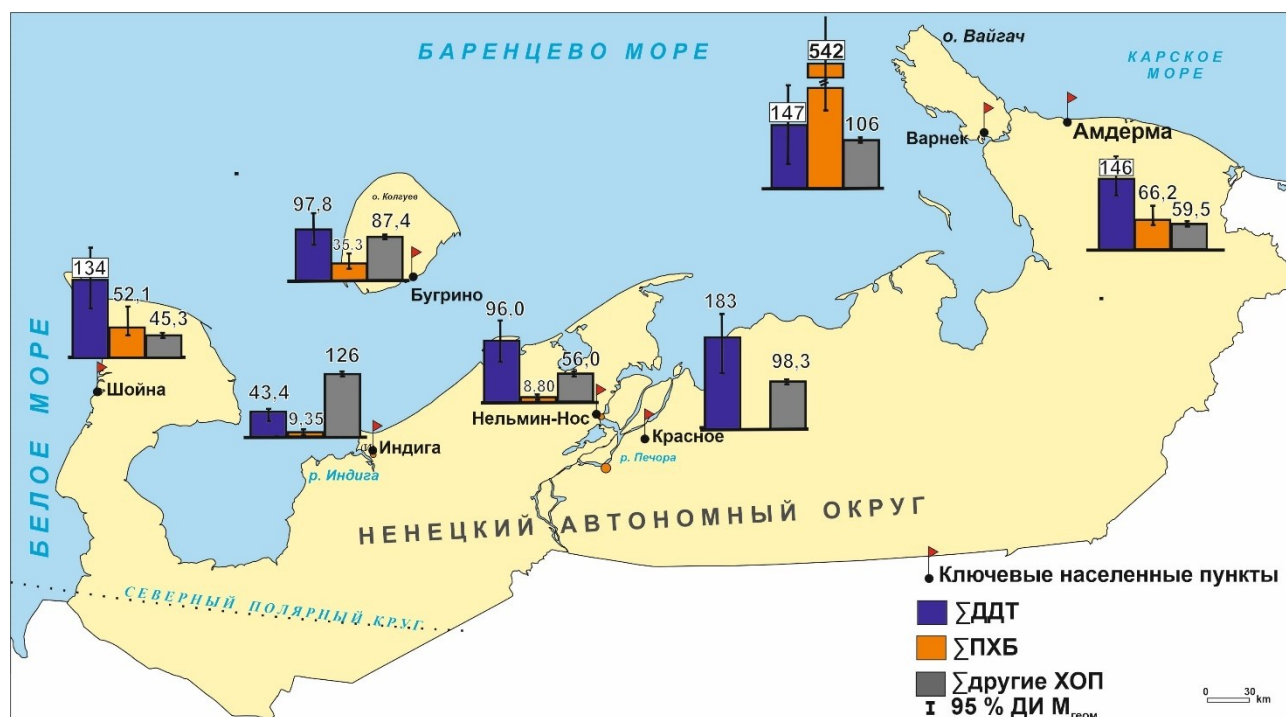


Рисунок 10 – Распределение основных групп СОЗ в сыворотке крови жителей Ненецкого АО в зависимости от места проживания, (среднее геометрическое значение, нг/г липидов)

У жителей о. Вайгач (пос. Варнек) был установлен максимальный уровень СОЗ: концентрация ΣПХБ была в 28 раз выше среднего значения, установленного для всей исследованной выборки жителей Ненецкого АО. Повышенный медианный уровень *p,p'*-ДДЕ наблюдался в западной (пос. Шойна), ПХБ 118 в восточной (пос. Амдерма) и ГХБ в центральной части региона (пос. Индига, пос. Красное). Таким образом, впервые получены уникальные данные о географических различиях в уровнях СОЗ в сыворотке крови населения в рамках субъекта Европейской части Российской Арктики.

Оценка экологических рисков СОЗ для здоровья жителей Ненецкого АО, связанных с потреблением промысловых видов рыб

Полученные значения коэффициентов экологического риска при потреблении местных продуктов питания жителями Ненецкого АО приведены в таблице 3. Из таблицы 3 видно, что потенциальный риск от воздействия СОЗ на здоровье жителей Ненецкого АО при потреблении традиционных продуктов питания (на примере рыб) отсутствует, полученные значения коэффициентов

опасности и дополнительного риска онкозаболеваний в течение жизни остаются ниже пороговых значений ($HQ < 0,2$; $ILCR < 1 \cdot 10^{-5}$).

Таблица 3 – Коэффициенты опасности и добавочного риска онкозаболеваний в течение жизни при воздействии основных СОЗ, обнаруженных в мышцах восьми исследованных видов рыб для жителей Ненецкого АО

Соединения	Суточная доза для коэффициента опасности (Доза для HQ)	Коэффициент опасности (HQ)	Суточная доза канцерогенной нагрузки (Доза для ILCR)	Дополнительный риск онкозаболеваний течение жизни (ILCR)
<i>Сёмга</i>				
Σ ДДТ	$6,1 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$
Σ ПХБ	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$
ГХБ	$6,5 \cdot 10^{-7}$	$8,1 \cdot 10^{-4}$	$4,4 \cdot 10^{-7}$	$7,0 \cdot 10^{-7}$
<i>Сельдь</i>				
Σ ДДТ	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$4,2 \cdot 10^{-8}$
Σ ПХБ	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	$5,8 \cdot 10^{-7}$
ГХБ	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$
<i>Арктический голец</i>				
Σ ДДТ	$7,2 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Σ ПХБ	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$
ГХБ	$5,1 \cdot 10^{-8}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$5,5 \cdot 10^{-8}$
<i>Азиатская корюшка</i>				
Σ ДДТ	$3,9 \cdot 10^{-8}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$	$9,1 \cdot 10^{-9}$
Σ ПХБ	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$
ГХБ	$8,8 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-8}$	$9,6 \cdot 10^{-8}$
<i>Горбуша</i>				
Σ ДДТ	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$8,1 \cdot 10^{-8}$
Σ ПХБ	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$
ГХБ	$7,7 \cdot 10^{-8}$	$9,6 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-8}$	$8,3 \cdot 10^{-8}$
<i>Навага</i>				
Σ ДДТ	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$8,1 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$
Σ ПХБ	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-7}$
ГХБ	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-8}$	$9,2 \cdot 10^{-8}$
<i>Сиг</i>				
Σ ДДТ	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-8}$
Σ ПХБ	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$
ГХБ	$7,8 \cdot 10^{-8}$	$9,7 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-8}$	$8,4 \cdot 10^{-8}$
<i>Щука</i>				
Σ ДДТ	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$4,6 \cdot 10^{-9}$
Σ ПХБ	$6,7 \cdot 10^{-8}$	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-8}$	$9,1 \cdot 10^{-8}$
ГХБ	$3,2 \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-8}$

Опасности в отравлении данными группами соединениями нет, риск угрозы здоровью и риск потенциального развития онкозаболеваний в течение жизни при потреблении рыб отсутствует для всех исследованных 8 видов гидробионтов, выловленных на территории Ненецкого АО в 2017–2018 гг.

Одним из самых популярных видов рыб в рационе питания жителей Ненецкого АО является сёмга. При среднем потреблении 5,4 кг/год данный вид не вызывает опасений. Однако для определённых групп жителей при потреблении сёмги более 16,5 кг/год и концентрацией ПХБ в мышечной ткани более 10 нг/г сырой массы возникает риск развития онкозаболеваний.

Стоит отметить, что средние данные не точно (не корректно) отражают действительный риск при использовании в рационе питания местной рыбы, что

требует проведения дальнейших исследований с увеличением выборки исследованных образцов, и проведения более точного анкетирования по вопросам питания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию аккумуляции СОЗ и влиянию на организм человека в Арктике в системе «традиционная пища-человек».

На примере арктического региона, Ненецкого АО, были установлены актуальные уровни СОЗ (ПХБ и ХОП) в мышцах промысловых видов рыб и сыворотке крови населения и дана оценка экологического риска для здоровья человека при потреблении данных видов рыб.

Согласно установленным ПДК СОЗ в рыбной продукции РФ, в мышцах сёмги, сельди, горбуши, арктического гольца, азиатской корюшки, наваги, сига и щуки, обитающих в водных экосистемах Ненецкого АО, уровень содержания ПХБ и ХОП не превысил допустимых нормативных значений. Тем самым можно утверждать, что по данным токсическим соединениям рыба не опасна и может быть использована в рационе питания жителей Арктики. Однако жирная рыба (сёмга, сельдь, горбуша) является одним из основных источников СОЗ для человека, о чем свидетельствуют полученные корреляционные зависимости.

Полученные результаты исследования показывают, что концентрации большинства СОЗ в сыворотке крови жителей Ненецкого АО европейской части Российской Арктики невелики и аналогичны таковым в других арктических странах. Значительные географические различия между поселениями были обнаружены для *p,p'*-ДДЕ, Σ ПХБ, ГХБ в данном регионе. У жителей семи сельских поселений Ненецкого АО не были получены статистически значимые уровни СОЗ от потребления конкретных видов рыб, возможно, это связано с ограниченным объемом выборки образцов гидробионтов только с одной части региона. Несмотря на большое количество рыбы в рационе питания коренных народов Ненецкого АО, существенных рисков не выявлено. Большинство устаревших ПХБ и ХОП имеют тенденцию к снижению, что может быть объяснено прошлыми национальными и региональными запретами и ограничениями на их использование и деградацию.

В работе впервые был применен и отработан алгоритм проведения мониторинговых исследований: анкетирование местного населения, выявление основных источников поступления СОЗ; анализ содержания СОЗ в продуктах питания; оценка рисков для здоровья человека (как конечного звена пищевой цепи). Предлагаемый подход позволяет оценить вклад данных токсических веществ в загрязнение экосистем Арктики. Полученные результаты на примере региона АЗРФ (Ненецкий АО) могут быть использованы в качестве базы данных для дальнейших биомониторинговых исследований по выявлению негативного антропогенного воздействия на экосистемы Арктики, для оценки долгосрочных тенденций в накоплении ПХБ и ХОП, выявления новых СОЗ в окружающей среде.

ВЫВОДЫ

1. Впервые определены концентрации полихлорированных бифениллов и хлорорганических пестицидов в промысловых видах рыб АЗРФ, которые показывают следующие видовые различия по общему уровню содержания СОЗ: сёмга>сельдь>горбуша>навага> арктический голец> азиатская корюшка>сиг>щука.

2. Установлено, что в промысловых видах рыб доминирующими загрязнителями являются *p,p'*-ДДЕ, ПХБ 153, 138, 128, 118, ГХБ и изомеры хлордана. Уровень СОЗ в мышечной ткани во многом определяется содержанием липидов, что подтверждается установленными интервалами концентраций ПХБ и ХОП для жирных сортов рыб (сёмга и горбуша). Показано, что аккумуляция транс-хлордана в мышечной ткани сига связана с увеличением возраста и массы особи. На примере арктического гольца, показаны географические различия по уровням СОЗ в особях одного вида: концентрация ПХБ и ДДТ в два раза выше в образцах, пойманных в Индигской губе Баренцева моря в сравнении с образцами рыб из Баренцева моря (близ о. Колгуев).

3. Предложено использовать горбушу в качестве модельного объекта ихтиофауны для изучения биологических эффектов загрязнения среды токсичными веществами в Арктике. Особенность быстрого роста особей за короткий жизненный цикл позволяет установить достоверную зависимость между всеми полученными уровнями СОЗ и содержанием липидов.

4. Содержание СОЗ в сыворотке крови жителей семи сельских поселений Ненецкого автономного округа снизилось в 2-10 раз по сравнению с 2002 годом. Средние геометрические концентрации для Σ ПХБ5, Σ ДДТ, Σ другие ХОП в сыворотке крови человека составили 21,0; 95,7 и 69,3 нг/г липидов соответственно. Наиболее часто в сыворотке крови населения обнаруживаются *p,p'*-ДДЕ, ПХБ 153, ГХБ и β -ГХЦГ, как и у жителей других арктических территорий, которые зависят от количества и вида потребляемых гидробионтов.

5. На примере Ненецкого АО показаны географические различия в уровнях содержания СОЗ в сыворотке крови населения. Островные (пос. Бугринот, Варнек) и прибрежные территории (пос. Шойна, Индига, Амдерма) отличаются высоким содержанием ПХБ, что во многом обусловлено большим потреблением жителями морских и анадромных видов рыб. Для центральной части (пос. Нельмин-Нос, Красное) характерно преобладание ГХБ и ДДТ.

6. Большинство исследуемых промысловых видов рыб Ненецкого автономного округа по содержанию СОЗ являются безопасным продуктом традиционной пищи. Исключение составляет сёмга, при среднем потреблении которой в количестве более 16,5 кг/год возникает потенциальная опасность для здоровья человека в связи с поступлением ПХБ.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ
Публикации в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень
ВАК РФ (и приравненных к ним):

1. **Варакина Ю.И.** Мониторинг стойких органических загрязнителей в промысловых рыбах Российской Арктики /Ю. И. Варакина, А. С. Аксёнов, Д. Е. Лахманов [и др.] // Теоретическая и прикладная экология. – 2023. – № 2. – С. 89–100.
2. **Varakina, Y.** Geographic and ethnic variations in serum concentrations of legacy persistent organic pollutants among men in the Nenets Autonomous Okrug, Arctic Russia / **Y. Varakina**, D. Lahmanov, A. Aksenov [et al.] // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2022. – V.19(3). – P. 1379.
3. **Varakina, Y.** Concentrations of Persistent Organic Pollutants in Women's Serum in the European Arctic Russia / **Y. Varakina**, D. Lahmanov, A. Aksenov [et al.] // Toxics. – 2021. – V. 9(1). – P. 6.
4. Lakhmanov, D., Persistent organic pollutants (POPs) in fish consumed by the indigenous peoples from nenets autonomous okrug / D. Lakhmanov, **Y. Varakina**, A. Aksenov [et al.] // Environments. – 2020. – V. 7. – P. 3.
5. Chukmasov, P. North Pacific Baleen Whales as a Potential Source of Persistent Organic Pollutants (POPs) in the Diet of the Indigenous Peoples of the Eastern Arctic Coasts / P. Chukmasov, A. Aksenov, T. Sorokina, (**Varakina**) [et al.] // Toxics. – 2019. – V. 7(4). – P. 65.

Патент РФ.

6. Патент № 2750725 Российская Федерация. Способ детоксикации рыбного сырья / В. П. Чашин, Д. А. Коцур, Е. А. Быстрицкая (**Варакина**) [и др.] Опубликовано 01.07.2021. Патентообладатель ФГАОУ ВО «Северный (арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова».

Наиболее значимые публикации в иных научных изданиях

7. **Варакина Ю.И.** Уровень полихлорированных бифенилов и хлорорганических пестицидов в сыворотке крови жителей Арктики / Ю. И. Варакина // Международная конференция «Биомониторинг в Арктике III»: сборник материалов. – 11-12 октября 2022. – Архангельск. – С. 25–28.
8. **Варакина, Ю.И.** Хлорорганические загрязнители в сыворотке крови жителей северо-западной части Арктики / **Ю.И. Варакина**, Д.Е. Лахманов, Р.Д. Коробицына // Международная конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность»: сборник – 20-23 сентября 2021. – Севастополь. – С. 109–112.
9. **Варакина, Ю.И.,** Уровень стойких органических загрязнителей в крови жителей арктического поселка на примере Ненецкого автономного округа / **Ю.И. Варакина**, А.С. Аксенов // Региональная научно-практическая конференции студентов, аспирантов и молодых учёных по естественным наукам: сборник материалов. – 15-30 апреля 2021. – Владивосток. – С. 571–574.

10. **Варакина, Ю.И.** Полихлорированные бифенилы в рыбах, потребляемых жителями п. Индиги (Ненецкий автономный округ) / **Ю.И. Варакина, Д.Е. Лахманов, А.С. Аксенов, А.Н. Трофимова** // Международная конференция «Биомониторинг в Арктике II»: сборник тезисов – 27-28 октября 2020. – Архангельск. – С. 35–40.
11. **Варакина, Ю.И.** Стойкие органические загрязнители в мигрирующих видах рыб Ненецкого автономного округа / **Ю.И. Варакина, Д. Е. Лахманов, А.С. Аксенов, Е.А. Веселкина** // Международная конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность»: сборник статей. – 23-26 сентября 2019. – Севастополь. – С. 355–359.
12. Trofimova, A. Arctic Floating University in the system of biomonitoring: expedition "Terraе Novae -2018" / A. Trofimova, **Yu. Varakina**, K. Zaikov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 263. – P. 012027.
13. Lahmanov, D. A short review of sample preparation methods for the pesticide residue analysis in fatty samples / D. Lahmanov, **Yu. Varakina** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 263(1). – P. 012061.
14. Трофимова А.Н., **Варакина Ю.И.** Апробация биологического мониторинга в Ненецком автономном округе в рамках экспедиции Арктический плавучий университет — 2018: «Terraе Novae» // Научная сессия студентов и аспирантов: сборник материалов. – 2018. – Архангельск. – С. 56.
15. Веселкина, Е.А. Оценка содержания токсичных и биогенных элементов в мышечных тканях рыб, обитающих на территории Ненецкого автономного округа / Е.А. Веселкина, **Ю.И. Варакина**, А.А. Онучина [и др.] // Международная конференция «Биомониторинг в Арктике »: сборник тезисов.– 26-27 ноября 2018. – Архангельск. – С. 154–156.