

ХЛОРООРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В АТЛАНТИЧЕСКОЙ ТРЕСКЕ (*GADUS MORHUA*) И МОРСКОЙ КАМБАЛЕ (*PLEURONECTES PLATESSA*) БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Е. А. Горбачева, М. А. Новиков

Полярный филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (Мурманск, Российская Федерация)

Для цитирования

Горбачева Е. А., Новиков М. А. Хлороорганические соединения в атлантической треске (*Gadus morhua*) и морской камбале (*Pleuronectes platessa*) Баренцева моря // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 4. — С. 562—574. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-562-574.

Статья поступила в редакцию 30 мая 2024 г.

Методом хромато-масс-спектрометрии изучено содержание хлороорганических пестицидов (ГХБ, α-ГХЦГ, β-ГХЦГ, γ-ГХЦГ, цис-хлордана, транс-хлордана транс-нонахлора, ДДТ и его метаболитов) и одиннадцати конгенов ПХБ (28, 31, 52, 99, 101, 105, 118, 138, 153, 156 и 180) в мышцах и печени атлантической трески и морской камбалы, выловленных в Баренцевом море в 2016–2022 гг. Показана видоспецифичность в накоплении хлороорганических соединений рыбами. Атлантическая треска отличалась от морской камбалы более низким содержанием ПХБ, ДДТ и хлорданов в мышцах и высоким в печени. Морская камбала больше загрязнена ГХЦГ и ГХБ (мышцы и печень). В тканях рыб в ΣГХЦГ преобладал α-ГХЦГ, в ΣДДТ – n, n¹-ДДЕ, в ΣПХБ – ПХБ-118, 138 и 153, что связано с особенностями загрязнения среды обитания и характеризует регион Баренцева моря.

Ключевые слова: Баренцево море, загрязнение, полихлорированные бифенилы, хлороорганические пестициды, ихтиофауна, треска, морская камбала.

Введение

Хлороорганические соединения (ХОС), как и другие стойкие органические загрязнители (СОЗ), характеризуются высокой устойчивостью к разложению, возможностью переноса на дальние расстояния, высокой токсичностью для живых организмов, способностью к биоаккумуляции [1]. К ХОС в том числе относятся полихлорированные бифенилы (ПХБ) и хлороорганические пестициды — гексахлорциклопексан (ГХЦГ), гексахлорбензол (ГХБ), хлорданы, дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ). Перечисленные соединения являются ксенобиотиками, т. е. синтезированы человеком и в естественной природной среде ранее не встречались. Они широко применялись в сельском хозяйстве (пести-

циды) и промышленности (ПХБ) в 40–60-х годах XX столетия [2]. Из-за высокой опасности для живых организмов и устойчивости в окружающей среде производство и применение ПХБ, ГХБ, ДДТ и хлорданов было ограничено или запрещено в ряде стран в 1970–1980-х годах [3], а в 2001 г. и на международном уровне решением Стокгольмской конвенции о СОЗ¹. Ограничения на применение технического ГХЦГ (смесь α-ГХЦГ, β-ГХЦГ и γ-ГХЦГ) были введены в Европе, США и Японии в 1970–1980-х годах, в то же время использование линдана (чистого γ-ГХЦГ) для обработки семян продолжалось, например в Канаде до 2004 г. и в США до 2009 г. [4]. В 2009 г. решением Сток-

¹ Stockholm Convention on persistent organic pollutants (POPs). — Available at: <https://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx>.

гольмской конвенции применение и производство α -, β -, γ -ГХЦГ было запрещено.

ХОС поступают в Арктику главным образом вследствие дальнего атмосферного переноса и вместе с океаническими течениями. По данным мониторинга, введение ограничений на производство и применение наиболее опасных ХОС привело к сокращению загрязнения ими атмосферы и биоты Арктики. Причем наиболее быстро содержание ХОС (запрещенных в 1970—1980-х годах) снижалось до 2000-х годов, а позже этот процесс замедлился, что может быть обусловлено медленной деградацией этих соединений в условиях Арктики, поступлением из вторичных источников (ремобилизация из-за потепления климата из природных резервуаров — многолетнего льда, вечной мерзлоты, почвы и донных отложений) и продолжающимися выбросами вследствие антропогенной деятельности [5].

В организм рыб ХОС поступают преимущественно вместе с пищей и из воды [6]. Рыбы-бентофаги при питании могут заглатывать также частицы донных отложений вместе с адсорбированными на них ХОС. Из-за высокой гидрофобности содержание этих соединений в донных отложениях, как правило, значительно выше, чем в воде [2; 7]. Загрязнение ХОС донных рыб, у которых жизнь особенно тесно связана с дном и в питании преобладает бентос, может быть выше, чем пелагических видов [8]. Удаление ХОС из организма рыб происходит через жабры, вместе с желчью, мочой и фекалиями, при биотрансформации и нересте (перенос из печени в ооциты при созревании икры и выметывание последней) [6]. По сравнению с млекопитающими и птицами рыбы менее эффективно метаболизируют ДДТ, так как у них отсутствуют некоторые ферменты, разрушающие ксенобиотики [7]. Рыбы также обладают ограниченной способностью к биотрансформации ПХБ, ГХБ и ГХЦГ [6; 9; 10].

ХОС могут оказывать негативное воздействие на живые организмы, в том числе на их репродуктивную функцию, развитие (включая мозг), иммунную и эндокринную системы, вызывать генетические мутации. Кроме того, при хроническом воздействии сублетальных концентраций ХОС на рыб наблюдается нарушение функции клеточных мембран и фермента АТФазы, ингибирование межклеточных взаимодействий, токсическое воздействие на печень (некроз и жировая дегенерация гепатоцитов), изъязвление и некроз клеток желудочно-кишечного тракта, повреждение наружных покровов (гиперплазия и гиперкератоз эпителия, отек) и т. д. [1; 3; 11].

Устойчивость ХОС к биотрансформации и высокая липофильность обусловили способность этих соединений накапливаться в пищевых цепях — биомагнификацию. Так, концентрации ХОС в морских рыбоядных птицах в 10—1000 раз выше, чем в зоопланктоне и рыбах. Особенно высокие концентрации ХОС определяются в жире морских млекопитающих [2—4].

Высокое содержание ХОС в рыбах может привести не только к токсическому воздействию соединений на самих рыб, но и негативно отразиться на различных организмах-хищниках, включая человека [11]. В странах Таможенного союза содержание ДДТ, ГХЦГ и ПХБ в рыбе и продукции из нее нормируется техническим регламентом «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС 021/2011)².

Атлантическая треска (*Gadus morhua* L., 1758) имеет огромный ареал и является важным промысловым объектом. В Баренцевом море обитает стадо северо-восточной арктической трески. В 2021 г. ее вылов российскими промысловыми судами составил 352,1 тыс. т. Встречается треска преимущественно на глубинах 100—300 м, совершает протяженные кормовые и нерестовые миграции. Относится к хищным рыбам и характеризуется высокой скоростью роста [12; 13].

Морская камбала (*Pleuronectes platessa* L., 1758) встречается вдоль всего Атлантического побережья Европы. В Баренцевом море она обитает главным образом в юго-восточной его части, совершая ежегодные миграции от берегов Мурмана в восточные и центральные районы. Камбала ведет донный образ жизни, закапывается в грунт, приспособившая свою окраску к фону субстрата. Морская камбала является бентофагом. Основу ее питания составляют двустворчатые моллюски и полихеты. При специализированном промысле в прибрежных районах Мурмана в исключительной экономической зоне России в 2011—2021 гг. вылавливали от 5,7 до 10,6 тыс. т морской камбалы [13; 14].

Цель исследований — получить и проанализировать данные по содержанию хлорорганических пестицидов (ХОП) и ПХБ, варьированию их состава (профиля) в мышцах и печени трески и морской камбалы из южных и восточных районов Баренцева моря.

Материал и методы

Пробы мышц и печени атлантической трески (*G. morhua*) и морской камбалы (*P. platessa*) были отобраны в рейсах научно-исследовательских судов Полярного филиала Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО) «Фритюф Нансен» и «Вильнюс» в 2016—2022 гг. в южных и восточных районах Баренцева моря (рис. 1). После отбора образцы тканевой рыбы помещали в пластиковые пакеты, замораживали и хранили до начала исследований при температуре -20°C .

Химико-аналитические исследования проб мышц и печени рыб проводили в лаборатории Полярного

² ТР ТС 021/2011 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции». — Утв. решением Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. № 880. — URL: <http://www.tsouz.ru/db/techreglam/Documents/TR%20TS%20PishevayaProd.pdf>.

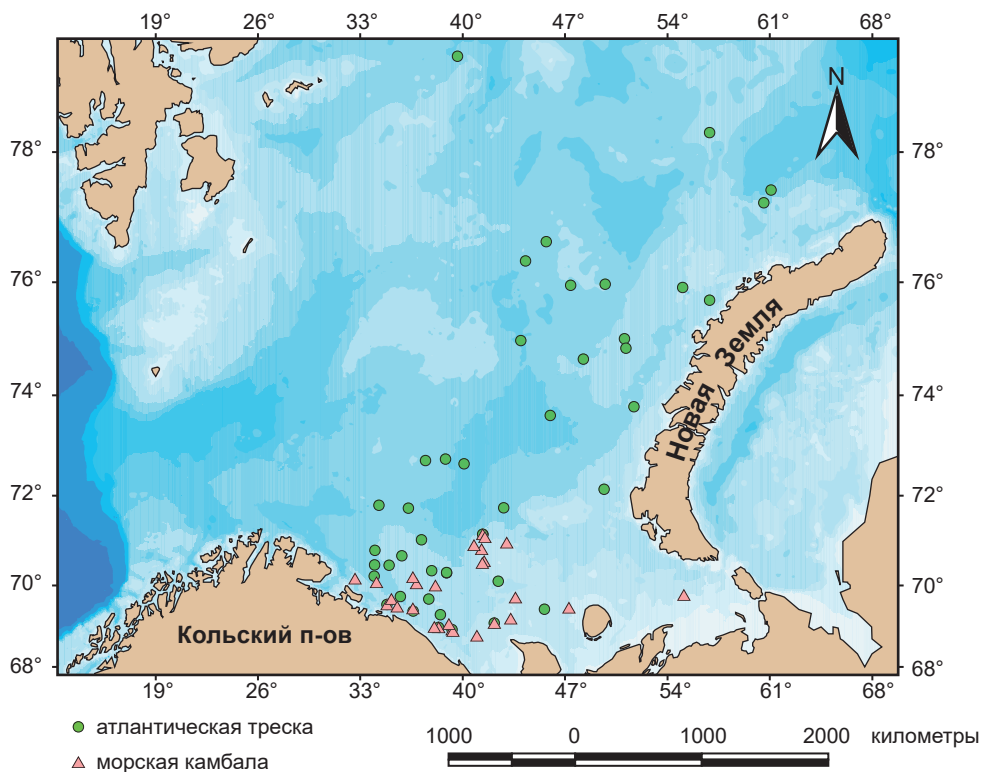


Рис. 1. Расположение станций отбора проб в Баренцевом море. Составлено авторами на картографической основе Esri
 Fig. 1. Location of sampling stations in the Barents Sea. Compiled by the authors using Esri cartographic data

филиала. Перед началом исследований пробы гомогенизировали. При экстракции липидов из проб использовали погружной гомогенизатор РТ 10-35 GT «POLYTRON». Экстракцию проводили дважды. Первый раз навеску гомогенизированных тканей рыб (0,5—10 г в зависимости от жирности) смешивали с 40 мл ацетона и экстрагировали в течение 3 мин. Затем для повышения скорости экстракции пробу на 30 мин помещали в ультразвуковую ванну УЗВ-10/150 ТМ «РЭЛТЭК» (рабочая частота 20 кГц, мощность 200 ± 50 Вт). После отделения первой порции экстракта к навеске добавляли 40 мл смеси *n*-гексана с ацетоном (3:1) и экстрагировали второй раз в течение 30 мин. Для очистки экстракта от липидов использовали концентрированную серную кислоту. Методика подготовки проб описана в [15].

Концентрации хлорорганических пестицидов и ПХБ в экстрактах определяли методом капиллярной газовой хроматографии на хромато-масс-спектрометре GCMS-QP2010 Plus «Shimadzu» с капиллярной кварцевой колонкой HP-5 MS длиной 30 м, диаметром 0,25 мм и толщиной фазы 0,25 мкм. Программа нагрева, использованная при исследованиях, такова: начальная температура 60°C (удерживание 2 мин), нагревание до 190°C со скоростью 20°C/мин и до 250°C со скоростью 3°C/мин (удерживание в течение 15 мин). Температура инжектора составляла 250°C, детектора — 260°C. Скорость газа-носителя (гелий) постоянная — 1 мл/мин. Хромато-масс-спектрометр работал в режиме

электронной ионизации. Идентификация индивидуальных соединений проводилась в режиме SIM (селективный мониторинг ионов). Количественное определение выполнялось с использованием калибровки тестовыми смесями, приготовленными из сертифицированных кристаллических ХОП фирмы «Sigma-Aldrich» (США). Для автоматической обработки результатов анализа использовалась программа GCMSsolution 2.5 фирмы «Shimadzu» (Япония). Для каждой серии проб анализировали «холостую» пробу, что позволяло контролировать загрязнение образцов при проведении анализа.

Определяли содержание в мышцах и печени рыб ГХБ, α -ГХЦГ, β -ГХЦГ, γ -ГХЦГ, *цис*-хлордана, *транс*-хлордана, *транс*-нонахлора, ДДТ и его метаболитов — дихлордифенилдихлорэтилена (ДДЕ) и дихлордифенилдихлорэтана (ДДД), а также конгенов ПХБ с номерами по номенклатуре IUPAC 28, 31, 52, 99, 101, 105, 118, 138, 153, 156, 180. Предел обнаружения для каждого из изученных ХОС составлял 0,05 нг/г сырой массы.

Всего были исследованы 31 экземпляр атлантической трески и 25 экземпляров морской камбалы. Морфометрические характеристики изученных рыб представлены в табл. 1.

Статистический анализ результатов исследований проводили в программах Excel 2016 и Statistica 13. Для оценки нормальности распределения полученных данных использовали критерий Шапиро — Уилка. При сравнении содержания ХОС в тканях

атлантической трески и морской камбалы применяли непараметрический *U*-критерий Манна — Уитни. Если содержание какого-либо ХОС в тканях было ниже предела обнаружения применяемого метода анализа, то при статистической обработке данных оперировали нулевым значением.

Результаты и обсуждение

Результаты исследований содержания ХОС в мышцах и печени атлантической трески и морской камбалы из южных и восточных районов Баренцева моря представлены в табл. 2. Следует отметить, что распределение величин содержания подавляющего большинства ХОС в мышцах и печени рыб отличалось от нормального.

Содержание суммы изомеров ГХЦГ (Σ ГХЦГ), суммы изомеров

Таблица 1. Морфометрические показатели исследованных рыб (среднее \pm стандартное отклонение/минимальное—максимальное значение)

Table 1. Morphometric parameters of the studied fish (mean \pm standard deviation/min.—max. measured value)

Год вылова	Количество экземпляров	Длина L, см	Вес, кг
<i>Атлантическая треска</i>			
2020	14	83,1 \pm 17,5/61—124	5,1 \pm 2,8/1,6—11,2
2021	17	84 \pm 16,8/60—119	6,4 \pm 4,8/1,5—7,4
<i>Морская камбала</i>			
2016	7	56,6 \pm 11,3/38—70	2,5 \pm 1,3/0,64—4,3
2017	4	45,8 \pm 5,9/38—52	0,99 \pm 0,45/0,50—1,6
2018	8	54,5 \pm 5,2/45—62	2,3 \pm 0,81/1,4—4,0
2021	3	57,8 \pm 6,7/52—65	2,4 \pm 1,2/1,6—3,8
2022	3	48,7 \pm 11,4/36—58	1,7 \pm 1,0/0,48—2,4

Таблица 2. Содержание ХОП и ПХБ в мышцах и печени рыб Баренцева моря, нг/г сырой массы

Table 2. OCP and PCB content in muscle and liver of fish from the Barents Sea, ng/g wet weight

Химическое соединение	Атлантическая треска				Морская камбала			
	Диапазон	Среднее	Медиана	МКИ *	Диапазон	Среднее	Медиана	МКИ
<i>Мышцы</i>								
α -ГХЦГ	0,15—1,5	0,60	0,61	0,39;0,78	0,54—2,9	1,5	1,4	1,2;1,8
β -ГХЦГ	0,05	0,05	0,05	0,05;0,05	0,05—1,14	0,37	0,26	0,05;0,62
γ -ГХЦГ	0,05—0,17	0,06	0,05	0,05;0,05	0,05—1,5	0,46	0,42	0,05;0,78
Σ ГХЦГ	0,25—1,6	0,70	0,71	0,51;0,88	0,74—5,2	2,3	2,0	1,4;3,1
ГХБ	0,05—0,11	0,06	0,05	0,05;0,05	0,05—2,5	0,66	0,40	0,2;0,89
о,п'-ДДЕ	0,05—0,19	0,11	0,11	0,08;0,13	0,11—0,79	0,24	0,22	0,14;0,3
п,п'-ДДЕ	0,08—0,62	0,26	0,25	0,21;0,31	0,17—2,06	0,96	0,89	0,49;1,39
о,п'-ДДД	0,06—0,62	0,12	0,15	0,11;0,23	0,11—0,69	0,32	0,28	0,19;0,45
п,п'-ДДД	0,05—0,27	0,13	0,11	0,08;0,15	0,11—0,95	0,40	0,35	0,21;0,59
о,п'-ДДТ	0,05—0,16	0,07	0,05	0,05;0,08	0,05—0,47	0,12	0,09	0,05;0,15
п,п'-ДДТ	0,05—0,16	0,05	0,06	0,05;0,07	0,05—1,1	0,36	0,14	0,1;0,63
Σ ДДТ	0,44—1,6	0,81	0,74	0,64;0,97	0,74—4,5	2,3	2,3	1,2;3,4
цис-хлордан	<0,05	—	—	—	<0,05—0,96	0,07	0	0;0
транс-хлордан	<0,05	—	—	—	<0,05—0,32	0,04	0	0;0
транс-нонахлор	<0,05	—	—	—	<0,05—0,44	0,16	0,12	0;0,27
Σ хлорданов	<0,05	—	—	—	<0,05—0,96	0,25	0,16	0,035;0,4
ПХБ-28	<0,05	—	—	—	<0,05	—	—	—
ПХБ-31	<0,05	—	—	—	<0,05	—	—	—

Химическое соединение	Атлантическая треска				Морская камбала			
	Диапазон	Среднее	Медиана	МКИ *	Диапазон	Среднее	Медиана	МКИ
ПХБ-52	0,05—0,14	0,06	0,05	0,05;0,06	0,1—0,7	0,3	0,3	0,15;0,45
ПХБ-99	<0,05	—	—	—	<0,05—0,2	0,2	0,2	0;0,32
ПХБ-101	0,05—0,14	0,05	0,05	0,05;0,06	0,1—1,0	0,4	0,3	0,18;0,66
ПХБ-105	0,05—0,18	0,06	0,05	0,05;0,07	0,1—0,6	0,2	0,2	0,1;0,43
ПХБ-118	0,08—0,37	0,15	0,13	0,1;0,17	0,2—1,5	0,6	0,5	0,3;1,0
ПХБ-138	0,10—0,67	0,34	0,32	0,23;0,42	0,3—1,9	0,8	0,7	0,38;1,2
ПХБ-153	0,11—0,58	0,34	0,32	0,25;0,41	0,3—2,0	0,9	0,8	0,41;1,2
ПХБ-156	<0,05	—	—	—	<0,05—0,3	0	0	0;0,08
ПХБ-180	<0,05	—	—	—	<0,05—0,4	0,1	0	0;0,2
ΣПХБ	0,46—2,4	1,0	0,97	0,8;1,2	1,0—8,3	3,5	3,1	1,9;5,6
<i>Печень</i>								
α-ГХЦГ	1,3—5,2	3,2	3,2	2,2;4,0	1,1—9,8	3,4	3,2	2,0;3,9
β-ГХЦГ	0,05	0,05	0,05	0,05;0,05	0,05—1,4	0,63	0,62	0,28;1,0
γ-ГХЦГ	0,05—0,21	0,06	0,05	0,05;0,05	0,05—1,6	0,59	0,64	0,1;1,1
ΣГХЦГ	1,4—5,3	3,3	3,3	2,3;4,1	1,18—11,0	4,6	4,7	3,2;5,5
ГХБ	1,2—7,5	3,0	2,6	2,0;3,68	0,52—14,6	6,5	7,6	1,7;10,7
о,п'-ДДЕ	0,41—2,8	1,6	1,5	0,99;2,1	0,27—4,1	1,7	1,5	0,73;2,4
п,п'-ДДЕ	11,3—104	27,5	23,8	18,3;31,6	1,52—22,7	8,1	7,3	5,0;10,9
о,п'-ДДД	0,67—4,8	1,6	1,8	1,3;2,2	0,47—5,1	1,3	1,6	0,76;2,3
п,п'-ДДД	1,2—16,9	4,2	4,5	2,9;5,4	0,29—10,9	4,5	4,0	2,3;6,6
о,п'-ДДТ	0,42—4,0	1,4	1,3	0,83;2,0	0,05—3,8	0,42	0,10	0,05;0,43
п,п'-ДДТ	0,72—20,1	2,8	3,6	2,2;4,0	0,10—9,7	2,8	2,3	0,25;4,4
ΣДДТ	16,3—65	36,8	36,1	27,5;45,0	4,0—43	19,1	17,8	12,6;24,7
цис-хлордан	<0,05—25	7,0	6,0	3,4;8,4	<0,05—6,6	1,5	0,96	0;2,2
транс-хлордан	<0,05—14,2	2,5	1,6	0,3;2,8	<0,05—4,1	0,80	0,69	0;1,2
транс-нонахлор	3,0—2,8	21,4	16,5	11,3;23,9	<0,05—7,8	2,6	2,0	0,66;4,4
Σхлорданов	3,0—96	30,9	24,6	16,7;31,4	<0,05—15,9	4,8	3,4	0,89;8,9
ПХБ-28	0,1—4,2	1,2	0,9	0,51;2,1	<0,05—0,18	0,02	0	0;0
ПХБ-31	0,1—2,7	0,7	0,5	0,14;0,88	<0,05—0,10	0,02	0	0;0
ПХБ-52	0,6—6,2	3,2	3,2	2,2;4,1	0,10—1,7	0,70	0,62	0,40;0,94
ПХБ-99	<0,05	—	—	—	<0,05—1,0	0,21	0,05	0,05;0,38
ПХБ-101	2,1—12,5	5,2	4,6	3,7;6,3	0,10—1,2	0,47	0,53	0,12;0,64
ПХБ-105	1,6—9,6	3,3	3,5	2,2;4,1	0,05—1,6	0,38	0,16	0,10;0,55
ПХБ-118	3,9—30	8,8	7,7	5,8;9,3	1,14—4,4	2,1	2,1	1,6;2,4
ПХБ-138	6,6—45	16,8	12,3	10,1;18,2	1,58—6,9	3,0	3,1	2,1;3,5

Химическое соединение	Атлантическая треска				Морская камбала			
	Диапазон	Среднее	Медиана	МКИ *	Диапазон	Среднее	Медиана	МКИ
ПХБ-153	7,6—53	18,7	14,1	9,4;19,4	1,79—7,2	3,3	3,3	2,2;3,9
ПХБ-156	<0,05—12,6	1,9	2,5	1,0;3,2	<0,05—0,84	0,19	0	0;0,3
ПХБ-180	<0,05—16,4	4,9	3,9	2,2;7,0	<0,05—1,8	0,44	0,23	0;0,86
ΣПХБ	25,0—172	65	52	42;69	6,1—25,0	10,9	10,0	8,1;13,3

* Межквартильный интервал (25%;75% процентиля).

и метаболитов ДДТ (ΣДДТ), суммы конгенов ПХБ (ΣПХБ) в мышцах и печени изученных видов рыб было на несколько порядков ниже предельных допустимых уровней (ПДУ), установленных ТР ТС 021/2011. Так, ПДУ содержания в мышцах морских рыб ΣГХЦГ составляет 200 нг/г, ΣДДТ — 200 нг/г, ΣПХБ — 2000 нг/г сырой массы. В печени рыб нормативы содержания ΣГХЦГ, ΣДДТ и ΣПХБ выше — 1000, 3000 и 5000 нг/г сырой массы соответственно. Содержание ГХБ и хлорданов в мышцах и печени рыб не нормируется.

В мышцах атлантической трески содержание ΣДДТ и ΣПХБ и составляло 0,74 и 0,97 нг/г (здесь и далее медиана) и было значительно ниже, чем в мышцах морской камбалы — 2,3 и 3,1 нг/г сырой массы соответственно (различия статистически значимы; $p = 0,000$). В мышцах трески также отмечено очень низкое накопление хлорданов (< 0,05 нг/г сырой массы), в мышцах морской камбалы суммарное содержание этих пестицидов было намного выше — 0,16 нг/г сырой массы. В то же время треска отличалась от камбалы более высоким содержанием ΣПХБ, ΣДДТ и суммы хлорданов (Σхлорданов) в печени ($p = 0,000—0,008$). В печени трески содержание ΣПХБ, ΣДДТ, Σхлорданов достигало 52,0, 36,1, 24,6 нг/г, морской камбалы — 10,0, 17,8, 3,4 нг/г сырой массы соответственно. Известно, что ХОС липофильны и накапливаются в жирах. В мышцах трески по сравнению с морской камбалой содержание жира на порядок ниже, а в печени — почти на порядок выше, что, вероятно, и стало одной из основных причин выявленных различий в накоплении ПХБ, ДДТ и хлорданов этими видами рыб. Так, в треске среднее содержание жира составляет 0,3% в мышцах и 52% в печени, а в морской камбале — 3,3% и 6,2% соответственно [16]. Полагают, что в рыбах с низким содержанием жира в мышцах последние не могут быть мишенями для накопления ХОС [17]. Нежирные виды рыб, такие как треска и сайда, накапливают липиды и ХОС главным образом в печени [18].

В морской камбале по сравнению с треской отмечено более высокое содержание ГХЦГ и ГХБ как в мышцах, так и в печени. Содержание ΣГХЦГ и ГХБ в мышцах морской камбалы составляло 2,0 и 0,40 нг/г, трески — 0,71 и 0,05 нг/г сырой массы соответственно. В печени морской камбалы содер-

жание ΣГХЦГ и ГХБ увеличивалось до 4,7 и 7,6 нг/г, трески — до 3,3 и 2,6 нг/г сырой массы соответственно. Причем различия между исследованными видами рыб по содержанию ΣГХЦГ и ГХБ в мышцах, а также ГХБ в печени оказались статистически значимы ($p = 0,000—0,009$). По мнению некоторых авторов [19], межвидовые различия в накоплении ХОС организмами также определяются стратегией питания и способностью к биотрансформации этих соединений, которая зависит от структуры последних и наличия ферментных систем, метаболизирующих ксенобиотики. Отличия в химической структуре и степени хлорирования ХОС влияют на их физико-химические свойства и накопление в биоте, особенно на низших трофических уровнях [7; 19]. Полученные нами данные позволяют предположить, что особенности метаболизма, различия в образе жизни и питания трески и морской камбалы, вероятно, оказывали более заметное влияние на уровень содержания ГХЦГ и ГХБ в мышцах и печени этих видов рыб, чем содержание жира.

Как показали наши исследования, содержание ΣДДТ, ΣПХБ и ГХБ в печени атлантической трески из восточных районов Баренцева моря ниже, чем по данным норвежских ученых в печени представителей этого же вида, выловленных в 2015 г. у побережья Северной Норвегии в юго-западной части моря — в среднем 72 ± 29 , 108 ± 43 , 20 ± 10 нг/г (\pm стандартное отклонение, SD) сырой массы соответственно [20]. Более высокое содержание перечисленных соединений в печени трески, выловленной у берегов Норвегии, вероятно, обусловлено близостью района отбора проб к хозяйственно освоенным участкам побережья, а также поступлением загрязнения из Западной Европы с водами Норвежского прибрежного течения.

По другим данным норвежских исследователей [21], в печени атлантической трески из Северного моря накопление ΣПХБ (82 ± 27 нг/г сырой массы) и ГХБ ($6 \pm 2,8$ нг/г сырой массы) было выше, а ΣГХЦГ ($0,5 \pm 0,19$ нг/г сырой массы) и ΣДДТ (28 ± 12 нг/г сырой массы) ниже значений, полученных нами для этого же вида из восточных районов Баренцева моря.

Особенно высокие уровни загрязнения атлантической трески ХОС регистрировали в Балтийском

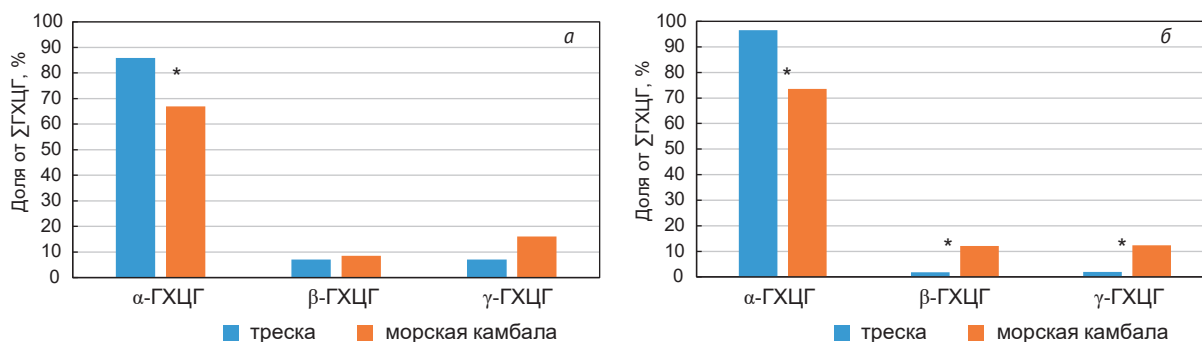


Рис. 2. Соотношение изомеров ГХЦГ (медианы) в мышцах (а) и печени (б) рыб Баренцева моря: * – различия статистически достоверны (U-критерий Манна – Уитни, $p < 0,05$). Составлено авторами

Fig. 2. The ratio of HCH isomers (medians) in muscle (a) and liver (б) of fish from the Barents Sea: * – variations are statistically reliable (Mann-Whitney U test, $p < 0,05$). Compiled by the authors

море. Содержание суммы 6 конгенов ПХБ (28, 52, 101, 138, 153 и 180) в мышцах и печени трески из Балтийского моря достигало 3,54 и 699 нг/г сырой массы соответственно [22], что значительно выше уровня, отмеченного в треске Баренцева моря. В печени балтийской трески (*Gadus morhua callarias* L.), выловленной в осенне-зимний период в южной части Балтийского моря, содержание ΣГХЦГ составляло 45 нг/г, ΣДДТ — 51 нг/г, ΣПХБ — 140 нг/г сырой массы [23] и также превышало таковое в печени исследованной нами атлантической трески.

По данным О. Н. Лукьяновой с соавторами [24], содержание ХОП (ΣДДТ + ΣГХЦГ) и конгенов ПХБ в мышцах камбалы *Hippoglossoides robustus* из южной части Охотского моря составило 0,72 и 0,8 нг/г, а из восточной части — 0,11 и 0,18 нг/г сырой массы соответственно, что ниже, чем в мышцах морской камбалы из Баренцева моря.

В печени балтийской камбалы (*Platichthys solemdali*) из южной части Балтийского моря по сравнению с морской камбалой из Баренцева моря значительно выше содержание ΣГХЦГ и ΣДДТ — 45 и 139 нг/г сырой массы соответственно [23]. Таким образом, можно утверждать, что уровень содержания ХОС в рыбе в значительной степени зависит от уровня антропогенного воздействия на район ее обитания.

Проведенные нами исследования показали, что в мышцах и печени трески и морской камбалы из Баренцева моря ГХЦГ был представлен преимущественно α-ГХЦГ (см. табл. 2). Содержание этого соединения в мышцах трески составляло 0,61 нг/г, морской камбалы — 1,4 нг/г сырой массы. Загрязнение α-ГХЦГ печени этих видов рыб почти не отличалось и достигало 3,2 нг/г сырой массы.

Из рис. 2 видно, что доля α-изомера в сумме ГХЦГ была максимальной в печени трески — 97% (доли β- и γ-ГХЦГ — 1,8 и 2% соответственно). По данным S. Voitsova и соавторов [21], в печени атлантической трески из Северного моря относительное содержание α-ГХЦГ было ниже и составляло в среднем только 61%, а доли β- и γ-изомеров в сумме ГХЦГ заметно выше — 19% и 20% соответственно. В прошлом технический ГХЦГ (смесь α-, β- и γ-изомеров) и линдан

(γ-изомер) применялись для борьбы с вредителями сельскохозяйственных растений в Северной Америке, Европе и Азии [3]. Отмечают, что β- и γ-изомеры ГХЦГ быстрее осаждаются на поверхность почвы или океана при атмосферном переносе, чем α-ГХЦГ [2; 25]. Кроме того, γ-ГХЦГ при воздействии ультрафиолетового облучения изомеризуется в α-ГХЦГ [7].

В морской камбале по сравнению с треской выше вклад в сумму ГХЦГ β- и γ-изомеров и ниже α-ГХЦГ (см. рис. 2), что может быть обусловлено дополнительным поступлением ГХЦГ в районы ее обитания в Баренцевом море вместе с водами Норвежского и Мурманского прибрежных течений. Эти течения переносят воды преимущественно из Балтийского моря [26], в бассейне которого в прошлом активно использовали технический ГХЦГ и линдан [3]. Не исключено, что соотношение изомеров ГХЦГ в водах прибрежных течений может отличаться от такового в других районах Баренцева моря.

В мышцах и печени исследованных рыб обнаружены *цис*-, *транс*-хлордан и *транс*-нонахлор. Из-за низкого содержания перечисленных соединений (ниже уровня аналитического определения) в мышцах трески мы смогли изучить соотношение пестицидов группы хлордана только в мышцах морской камбалы и печени рыб.

По данным исследований в сумме хлорданов в мышцах морской камбалы, а также в печени обеих рыб преобладал *транс*-нонахлор (см. табл. 2). Содержание этого соединения в мышцах морской камбалы составило 0,12 нг/г, в печени атлантической трески и морской камбалы — 16,5 и 2,0 нг/г сырой массы соответственно. Причем в мышцах морской камбалы вклад *транс*-нонахлора в общее содержание хлорданов достигал 100%, в печени морской камбалы и атлантической трески — 68% и 52% соответственно (рис. 3).

Следует отметить, что *цис*-хлордан, *транс*-хлордан и *транс*-нонахлор являлись основными компонентами пестицида хлордана. Доля *транс*-нонахлора в технической смеси пестицида хлордана, включающего более 120 родственных соединений, составляла 5,7% [27]. Вместе с тем *транс*-нонахлор характеризуется

устойчивостью к разложению, высокой гидрофобностью и в большей степени подвергается биоаккумуляции, чем другие хлорданы [28], что, вероятно, способствует его накоплению в морской рыбе.

В мышцах и печени исследованных рыб Баренцева моря идентифицированы изомеры ДДТ (о,п'-ДДТ и п,п'-ДДТ) и его метаболиты ДДЕ (о,п'-ДДЕ и п,п'-ДДЕ) и ДДД (о,п'-ДДД и п,п'-ДДД). Изомеры и метаболиты ДДТ различаются по характеру токсического действия на рыб. Воздействие технического ДДТ, используемого в качестве пестицида, может приводить к снижению выживаемости рыб на всех стадиях жизненного цикла, а о,п'-ДДТ, п,п'-ДДЕ и о,п'-ДДЕ преимущественно оказывают влияние на поведение и нарушают работу эндокринной и иммунной систем [3; 29]. Особо отмечают, что о,п'-изомеры ДДТ и его метаболитов проявляют эстрогенную активность [30].

В сумме изомеров и метаболитов ДДТ в мышцах и печени исследованных видов рыб Баренцева моря доминировал метаболит п,п'-ДДЕ (см. табл. 2). Содержание п,п'-ДДЕ в мышцах атлантической трески и морской камбалы достигало 0,25 и 0,89 нг/г, печени — 23,8 и 7,3 нг/г сырой массы соответственно. Доля п,п'-ДДЕ в общем содержании изомеров и метаболитов ДДТ была наиболее высока в печени трески — 68% (рис. 4). Известно, что п,п'-ДДЕ является наиболее распространенным в окружающей среде метаболитом ДДТ, характеризуется высокой токсичностью и устойчивостью к биоразложению [2; 3].

Вклад исходного соединения п,п'-ДДТ в общее содержание ДДТ в тканях исследованных рыб не превышал 15%. Так, содержание в мышцах трески и морской камбалы п,п'-ДДТ составляло 0,06 и 0,14 нг/г, печени — 3,6 и 2,3 нг/г сырой массы соответственно. Более высокое накопление п,п'-ДДЕ по сравнению п,п'-ДДТ указывает на длительный процесс трансформации пестицида и его давнее применение.

Метаболиты ДДЕ и ДДД поступают в организм рыб не только из окружающей среды и вместе с пищей, но и образуются в их тканях при биотрансформации ДДТ [7]. Треска и морская камбала Баренцева моря отличались по относительному содержанию

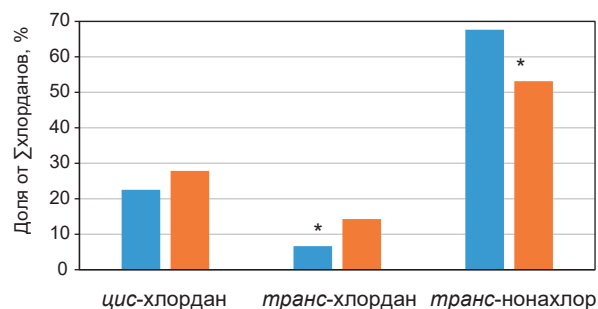
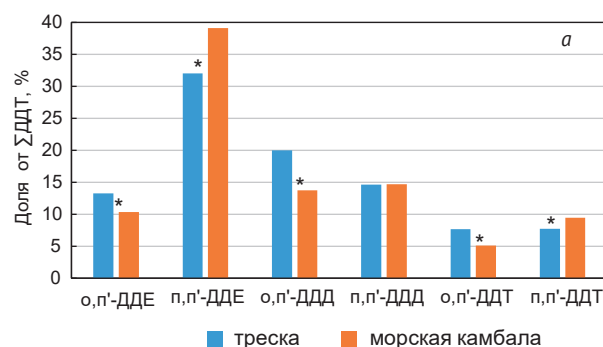


Рис. 3. Соотношение хлорданов (медианы) в печени рыб Баренцева моря: * — различия статистически достоверны (U-критерий Манна – Уитни, $p < 0,05$). Составлено авторами
Fig. 3. Chlordane ratio (medians) in liver of fish from the Barents Sea: * — variations are statistically reliable (Mann-Whitney U test, $p < 0,05$). Compiled by the authors

большинства изомеров и метаболитов ДДТ как в мышцах, так и в печени (см. рис. 4), что указывает на видоспецифичность в накоплении этих соединений рыбами.

Следует отметить, что основой технического ДДТ являются изомеры п,п'-ДДТ и о,п'-ДДТ, доля которых составляет 75—85% и до 15% соответственно, а соотношение о,п'-ДДТ/п,п'-ДДТ варьирует от 0,2 до 0,3 [31]. В мышцах исследованных нами рыб, а также в печени трески соотношение о,п'-ДДТ/п,п'-ДДТ колебалось в диапазоне от 0,49 до 1 (рис. 5), что заметно выше такового в исходном пестициде. В то же время в печени морской камбалы указанное соотношение было очень низким — 0,13. По опубликованным данным, в биоте наблюдается заметная вариабельность соотношения о,п'/п,п'-изомеров для ДДТ и его метаболитов, что указывает на значительное влияние на него процессов трансформации и переноса этих соединений в живых организмах [30].

Индивидуальные соединения (конгенеры) ПХБ отличаются количеством и расположением атомов хлора в ароматических ядрах. Как показали исследования, в мышцах и печени трески и морской камбалы Баренцева моря в сумме ПХБ доминировали пента- и гексаконгенеры — ПХБ-118 (14—20%),

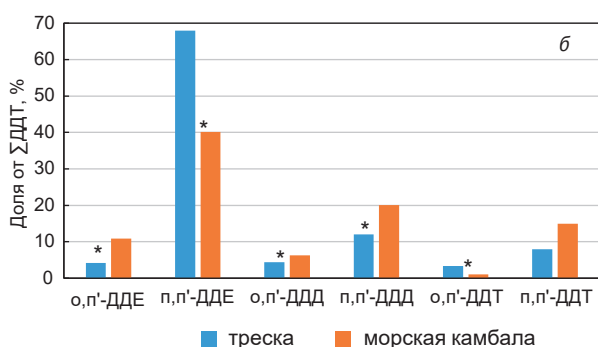


Рис. 4. Соотношение изомеров и метаболитов ДДТ (медианы) в мышцах (а) и печени (б) рыб Баренцева моря: * — различия статистически достоверны (U-критерий Манна – Уитни, $p < 0,05$). Составлено авторами
Fig. 4. The ratio of DDT isomers and metabolites (medians) in muscle (a) and liver (b) of fish from the Barents Sea: * — variations are statistically reliable (Mann-Whitney U test, $p < 0,05$). Compiled by the authors

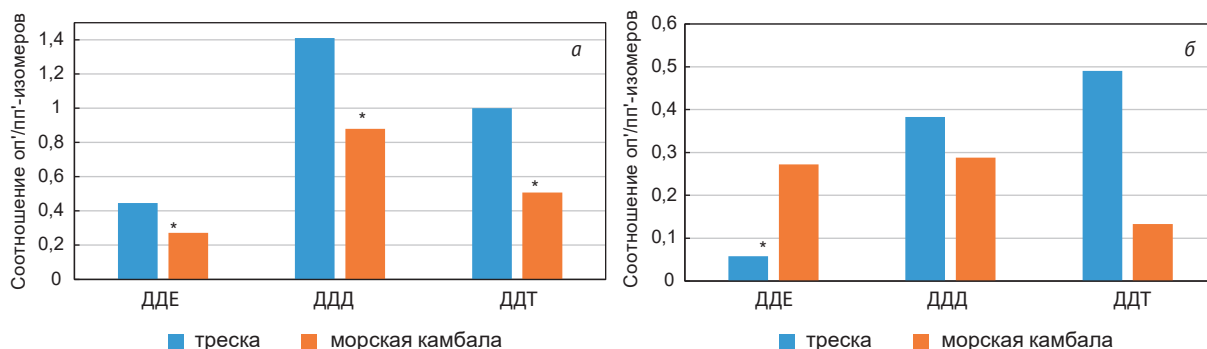


Рис. 5. Соотношение о,п/п,п'-изомеров (медианы) для ДДТ и его метаболитов в мышцах (а) и печени (б) рыб Баренцева моря: * – различия статистически достоверны (U-критерий Манна – Уитни, $p < 0,05$). Составлено авторами

Fig. 5. The ratio of o,p/p,p'-isomers (medians) for DDT and its metabolites in muscle (a) and liver (b) of fish from the Barents Sea: * – variations are statistically reliable (Mann-Whitney U test, $p < 0,05$). Compiled by the authors

ПХБ-138 (24—33%) и ПХБ-153 (26—32%) (рис. 6). В мышцах трески содержание конгенов 118, 138 и 153 составляло 0,13, 0,32, 0,32 нг/г, морской камбалы — 0,5, 0,7 и 0,8 нг/г сырой массы соответственно (см. табл. 2). Содержание конгенов 118, 138 и 153 увеличивалось в печени трески до 7,7, 12,3 и 14,1 нг/г, морской камбалы — до 2,1, 3,1 и 3,3 нг/г сырой массы соответственно.

Наиболее токсичны для живых организмов планарные (соединения ПХБ, в которых отсутствуют атомы хлора в орто-положениях) и частично моноортозамещенные ПХБ. По токсическим свойствам такие ПХБ близки к диоксинам и фуранам, и их относят к группе диоксиноподобных ПХБ [1]. В тканях исследованных рыб среди идентифицированных соединений диоксиноподобными являются ПХБ-105, ПХБ-118 и ПХБ-156. Вклад конгенера 118 в сумму ПХБ значительно выше, чем конгенов 105 или 156 (см. рис. 6). Причем в мышцах рыб и печени морской камбалы содержание конгенера 156 было особенно низким и не превышало уровня аналитического определения (см. табл. 2). Суммарный вклад диоксиноподобных конгенов в общую сумму ПХБ составлял по медиане 20—25% (табл. 3).

Полученные нами данные согласуются с результатами норвежских исследователей [32], согласно

которым в промысловых рыбах из северо-восточной части Атлантического океана, включающей юго-западную часть Баренцева моря, в сумме диоксиноподобных ПХБ преобладает ПХБ-118, а не диоксиноподобных — ПХБ-138 и ПХБ-153. Анализ литературных данных по накоплению ПХБ в тканях морских и пресноводных рыб из различных регионов, проведенный А. Arias с соавторами [11], позволил расположить конгенеры ПХБ по мере убывания их содержания в следующем порядке: 153, 138, 169, 126, 77 и 87, что не противоречит полученным нами данным.

Накопление в мышцах и печени рыб преимущественно высокохлорированных ПХБ (пента- и гексаконгенеры) обусловлено тем, что низкохлорированные легче подвергаются биотранформации [33]. Вклад высокохлорированных конгенов в общую сумму ПХБ, как правило, возрастает при переходе от низких к более высоким уровням пищевой цепи [2—4]. Механизм токсического действия ПХБ на живые организмы основан на индукции монооксидазной системы цитохрома Р-450, ответственной за окислительный метаболизм ксенобиотиков и эндогенных соединений гидрофобной природы [1]. По данным исследований [3; 34; 35], при повышенном накоплении ПХБ в тканях рыб происходит образование активных форм кислорода и наблюдаются не-

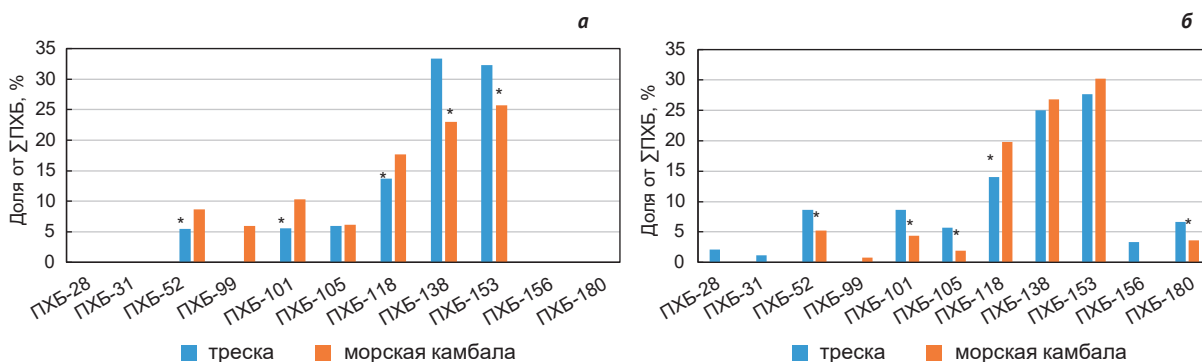


Рис. 6. Соотношение конгенов ПХБ (медианы) в мышцах (а) и печени (б) рыб Баренцева моря: * – различия статистически достоверны (U-критерий Манна – Уитни, $p < 0,05$). Составлено авторами

Fig. 6. The ratio of PCB congeners (medians) in muscle (a) and liver (b) of fish from the Barents Sea: * – variations are statistically reliable (Mann-Whitney U test, $p < 0,05$). Compiled by the authors

Таблица 3. Вклад диоксиноподобных конгенов (ПХБ-105 + ПХБ-118 + ПХБ-156 в общую сумму ПХБ, %

Table 3. Contribution of dioxin-like congeners (PCB-105 + PCB-118 + PCB-156) to the total amount of PCBs, %

Вид	Мышцы				Печень			
	Диапазон	Среднее	Медиана	МКИ *	Диапазон	Среднее	Медиана	МКИ
Атлантическая треска	12—33	22	20	17;28	13—31	23	24	20;26
Морская камбала	16—29	25	25	22;28	9—38	24	24	21;27

* Межквартильный интервал (25%;75% процентиля).

благоприятные эффекты, связанные с окислительным стрессом: повреждение компонентов клеток, разрушение низкомолекулярных гормонов, витаминов, метаболитов и т. д.

Исследованные нами виды рыб отличались по соотношению большинства изученных конгенов ПХБ как в мышцах, так и в печени (см. рис. 6). Следует обратить внимание на более высокий вклад конгенера 118 в сумму ПХБ в мышцах и печени морской камбалы по сравнению с треской (различия статистически достоверны, $p = 0,000$). Так, доля конгенера 118 в сумме ПХБ в мышцах и печени морской камбалы составляла 18% и 20% соответственно, а в мышцах и печени трески не превышала 14%. Кроме того, в морской камбале более заметна доля конгенера 99 (6% в мышцах и 0,7% в печени), содержание которого в исследованных тканях трески было ниже уровня аналитического определения.

Значительная часть жизни морской камбалы проходит у Мурманского берега Кольского полуострова (нерест, зимовка, нагул молоди, миграции вдоль побережья) в отличие от атлантической трески, совершающей более протяженные миграции и встречающейся практически по всей акватории Баренцева моря [12; 14]. Более высокое относительное содержание ПХБ-99 и ПХБ-118 в камбале, возможно, обусловлено близостью районов ее обитания к побережью Кольского полуострова и дополнительным поступлением этих соединений из местных источников. По известным данным, в мышцах озерных рыб, щуки, сига, налима, хариуса и речного окуня северо-запада Кольского полуострова (Печенгский район Мурманской области) доли конгенов 118 и 99 в сумме из пятнадцати конгенов ПХБ достигали 18,1—25,4% и 9,9—24,9% соответственно [36]. Это заметно выше, чем по нашим данным в мышцах атлантической трески. По относительному накоплению в мышцах ПХБ-99 и ПХБ-118 рыбы из водоемов северо-запада Кольского полуострова и морская камбала Баренцева моря отличались меньше, что подтверждает предположение о местном дополнительном источнике загрязнения ПХБ. Из источников загрязнения, расположенных на северо-западе Кольского полуострова, ПХБ могут поступать в при-

брежные районы моря в результате атмосферного переноса и вместе с терригенным стоком, особенно в период весеннего половодья и осенних паводков.

В заключение отметим, что по данным наших исследований атлантическая треска и морская камбала Баренцева моря различались по уровню загрязнения ХОС, соотношению изомеров ГХЦГ, хлорданов, изомеров и метаболитов ДДТ, конгенов ПХБ в мышцах или печени. Видоспецифичность в накоплении ХОС в рыбе может быть обусловлена различиями в содержании жира, скорости метаболизма, липидного обмена и роста, а также жизненным циклом, средой обитания, трофическим положением и характером нереста [32]. Полагают, что накопление ХОС в рыбах в большинстве случаев отражает содержание этих соединений в среде обитания [37].

Выводы

В ходе проведенных исследований показано, что содержание Σ ГХЦГ, Σ ДДТ и Σ ПХБ в мышцах и печени атлантической трески и морской камбалы Баренцева моря было на несколько порядков ниже предельно допустимых уровней, установленных ТР ТС 021/2011.

Атлантическая треска и морская камбала из Баренцева моря существенно различались не только по общему содержанию ХОС, но и по соотношению изомеров ГХЦГ, изомеров и метаболитов ДДТ, конгенов ПХБ и хлорданов в мышцах и печени. Это свидетельствует в пользу видоспецифичности загрязнения рыб этими соединениями.

Атлантическая треска отличалась от морской камбалы более низким содержанием ПХБ, ДДТ и хлорданов в мышцах и высоким содержанием в печени. В то же время мышцы и печень морской камбалы по сравнению с треской характеризовались большим уровнем накопления ГХЦГ и ГХБ. При этом с возрастанием жирности тканей исследованных рыб содержание ХОС, как правило, увеличивалось. Накопление всех изученных ХОС в печени рыб превышало таковое в мышцах.

Показано, что в тканях исследованных рыб в Σ ГХЦГ доминировал α -ГХЦГ, в Σ ДДТ – p,p' -ДДЕ, в Σ ПХБ — ПХБ-118, ПХБ-138 и ПХБ-153. Вклад

α-изомера в сумму ГХЦГ и п,п'-ДДЕ в сумму ДДТ в печени атлантической трески был исключительно высок — 97% и 68% соответственно. Приведенные особенности, вероятно, отражают влияние специфики загрязнения среды обитания и характеризуют регион Баренцева моря (особенности регионально-го фона).

Литература/References

1. Майстренко В. Н., Ключев Н. А. Эколого-аналитический мониторинг стойких органических загрязнителей. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. — 323 с.
Maistrenko V. N., Kliuev N. A. Ecological and analytical monitoring of persistent organic pollutants. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2009, 323 p. (In Russian).
2. Батоев В. Б., Цыденова О. В., Нимацыренова Г. Г. и др. Стойкие органические загрязнители в бассейне озера Байкал: Аналитический обзор. — Новосибирск, 2004. — 110 с.
Batoev V. B., Tsydenova O. V., Nimatsyrenova G. G. et al. Persistent Organic Pollutants in Lake Baikal Basin: Analytical review. Novosibirsk, 2004, 110 p. (In Russian).
3. AMAP Assessment 2002: Persistent Organic Pollutants in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway, 2004, 309 p.
4. AMAP Assessment 2015: Temporal Trends in Persistent Organic Pollutants in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway, 2016, 71 p.
5. AMAP Assessment 2020: POPs and Chemicals of Emerging Arctic Concern: Influence of Climate Change. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway, 2021, 131 p.
6. Kania-Korwel I., Lehmler H.-J. Toxicokinetics of chiral polychlorinated biphenyls across different species — a review. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 2016, vol. 23 (3), pp. 2058—2080. DOI: 10.1007/s11356-015-4383-0.
7. Ровинский Ф. Я., Воронова Л. Д., Афанасьев М. М. и др. Фоновый мониторинг загрязнения экосистем суши хлорорганическими соединениями. — Л.: Гидрометеоиздат, 1990. — 270 с.
Rovinsky L. D., Voronova M. I., Afanasyev A. V. et al. Background monitoring of ground ecosystems contamination by organochlorine compounds. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1990, 270 p. (In Russian).
8. Oliva A. L., La Colla N. S., Arias A. H. et al. Distribution and human health risk assessment of PAHs in four fish species from a SW Atlantic estuary. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2017, vol. 24 (23), pp. 18979—18990. DOI: 10.1007/s11356-017-9394-6.
9. Barber J. L., Sweetman A. J., van Wijk D. et al. Hexachlorobenzene in the global environment: emissions, levels, distribution, trends and processes. *Sci. Total Environ.*, 2005, vol. 349, pp. 1—44. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.03.014.
10. Borgå K., Gabrielsen G. W., Skaare J. U. Biomagnification of organochlorines along a Barents Sea food chain. *Environ. Pollut.*, 2001, vol. 113, pp. 187—198. DOI: 10.1016/s0269-7491(00)00171-8.

11. Arias A. H., Oliva A. L., Ronda A. C. et al. PCBs Transfer in Marine Trophic Webs: From Fish to Top Predators. *Advances in Environmental Research*, vol. 50. J. A. Daniels (ed.). N.Y., Nova Science Publishers Inc., 2016, pp. 55—88.
12. Бойцов В. Д., Лебедь Н. И., Пономаренко В. П. и др. Треска Баренцева моря (биолого-промысловый очерк). — Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1996. — 285 с.
Boitsov V. D., Lebed N. I., Ponomarenko V. P. et al. The Barents Sea cod (biological and fisheries outline). Murmansk, PINRO Press, 1996, 285 p. (In Russian).
13. Александров Д. И., Амеликин А. В., Амеликина А. С. и др. Состояние сырьевых биологических ресурсов Баренцева, Белого и Карского морей и Северной Атлантики в 2021 г. — Мурманск: ПИНРО им. Н. М. Книповича, 2021. — 146 с.
Aleksandrov D. I., Amelkin A. V., Amelkina A. S. et al. State of raw biological resources of the Barents, White and Kara seas and the North Atlantic in 2021. Murmansk, PINRO named after N. M. Knipovich, 2021, 146 p. (In Russian).
14. Ихтиофауна и условия ее существования в Баренцевом море / Гл. ред. Г. Г. Матишов. — Апатиты: Изд-во КНЦ АН СССР, 1986. — 213 с.
Ichthiofauna and conditions of its existence in the Barents Sea. G. G. Matishov (ed.). Apatity, Publish. House of the Kola Scientific Center of the USSR Academy of Sciences, 1986, 213 p. (In Russian).
15. Stange K., Klungsøyr J. Organochlorine contaminants in fish and polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from the Barents Sea. *ICES J. Mar. Sci.*, 1997, vol. 54, pp. 318—332.
16. Константинова Л. Л., Двинин Ю. Ф., Лебская Т. К., Кузьмина В. И. Технохимические свойства промысловых рыб Северной Атлантики и прилегающих морей Северного Ледовитого океана. — Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1997. — 183 с.
Konstantinova L. L., Dvinin Yu. F., Lebskaya T. K., Kuzmina V. I. Technochemical properties of commercial fish of the North Atlantic and adjacent seas of the Arctic Ocean. Murmansk, PINRO Press, 1997, 183 p. (In Russian).
17. Ballesteros M. L., Gonzalez M., Wunderlin D. A. et al. Uptake, tissue distribution, and metabolism of the insecticide endosulfan in *Jenynsia multidentata* (Anablepidae, Cyprinodontiformes). *Environ. Pollut.*, 2011, vol. 159 (6), pp. 1709—1714. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.02.037.
18. Julshamn K., Duinker A., Berntssen M. et al. A baseline study on levels of polychlorinated dibenzo-p-dioxins, polychlorinated dibenzofurans, non-ortho and mono-ortho PCBs, non-dioxin-like PCBs and polybrominated diphenyl ethers in Northeast Arctic cod (*Gadus morhua*) from different parts of the Barents Sea. *Mar. Pollut. Bull.*, 2013, vol. 75 (1), pp. 250—258. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2013.07.017.
19. Hoekstra P. F., O'Hara T. M., Fisk A. T. et al. Trophic transfer of persistent organochlorine contaminants (OCs) within an Arctic marine food web from

- the southern Beaufort–Chukchi Seas. *Environ. Pollut.*, 2003, vol. 124, pp. 509–522.
20. Boitsov S., Grøsvik B. E., Nesje G., Malde K., Klungsoyr J. Levels and temporal trends of persistent organic pollutants (POPs) in Atlantic cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) from the southern Barents Sea. *Environ. Res.*, 2019, vol. 172, pp. 89–97.
21. Boitsov S., Frantzen S., Bruvold A., Grøsvik B. E. Varying temporal trends in the levels of six groups of legacy persistent organic pollutants (POPs) in liver of three gadoid species from the North Sea. *Chemosphere*, 2024, vol. 349, p. 140939. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140939.
22. Karl H., Kammann U., Aust M.-O. et al. Large scale distribution of dioxins, PCBs, heavy metals, PAH-metabolites and radionuclides in cod (*Gadus morhua*) from the North Atlantic and its marginal seas. *Chemosphere*, 2016, vol. 149, pp. 294–303. DOI: 10.21443/1560-9278-2016-3-617-624.10.1016/j.chemosphere.2016.01.052.
23. Дубова О. Л., Бахолдина Л. П., Шендерюк В. В. Безопасность рыбной продукции в аспекте мониторинга хлорорганических соединений водных биологических ресурсов Балтийского региона // Вестн. МГТУ. — 2016. — Т. 19, № 3. — С. 617–624. — DOI: 10.21443/1560-9278-2016-3-617-624.
- Dubova O. L., Bakholdina L. P., Shenderyuk V. V. Chlorinated organic compounds in aquatic biological resources of the Baltic region. *Vestnik MGTU*. [Vestnik of MSTU], 2016, vol. 19, no. 3, pp. 617–624. DOI: 10.21443/1560-9278-2016-3-617-624. (In Russian).
24. Lukyanova O. N., Tsygankov V. Yu., Boyarova M. D. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in the Bering flounder (*Hippoglossoides robustus*) from the Sea of Okhotsk. *Mar. Pollut. Bull.*, 2018, vol. 137, pp. 152–156. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.10.017.
25. Iwata H., Tanabe S., Sakal N., Tatsukawa R. Distribution of persistent organochlorines in the oceanic air and surface seawater and the role of ocean on their global transport and fate. *Environ. Sci. Technol.*, 1993, vol. 27, pp. 1080–1098.
26. Ожигин В. К., Ившин В. А., Трофимов А. Г. и др. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. — Мурманск: ПИНРО, 2016. — 260 с.
- Ozigin V. K., Ivshin V. A., Trofimov A. G. et al. The Barents Sea Water: structure, circulation, variability. *Murmansk, PINRO*, 2016, 260 p. (In Russian).
27. Bondy G. S., Newsome W. H., Armstrong C. L. et al. Trans-Nonachlor and cis-nonachlor toxicity in Sprague-Dawley rats: comparison with technical chlordane. *Toxicol. Sci.*, 2000, vol. 58 (2), pp. 386–398.
28. Xuereb N., Olafsdottir K., Samarra F. et al. POPs in long-finned pilot whales mass stranded in Iceland as a proxy for their physiological condition. *Mar. Pollut. Bull.*, 2023, vol. 197, 115758. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115758.
29. Hinck J. E., Norstrom R. J., Orazio C. E. et al. Persistence of organochlorine chemical residues in fish from the Tombigbee River (Alabama, USA): Continuing risk to wildlife from a former DDT manufacturing facility. *Environ. Pollut.*, 2009, vol. 157 (2), pp. 582–591. DOI: 10.1016/j.envpol.2008.08.021.
30. Ricking M., Schwarzbauer J. DDT isomers and metabolites in the environment: an overview. *Environ. Chem. Lett.*, 2012, vol. 10, pp. 317–323. DOI: 10.1007/s10311-012-0358-2.
31. Агапкина Г. И., Бродский Е. С., Шелепчиков А. А., Артюхова М. В. Трансформация и форма поступления дихлордифенилтрихлорэтана (ДДТ) в почвы Москвы. — Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. — 2017. — № 3. — С. 39–46.
- Agapkina G. I., Brodskiy E. S., Shelepchikov A. A., Artyukhova M. V. Transformation and Form of Dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) Applied to Moscow Soils. *Moscow Univ. Soil Sci. Bull.*, 2017, vol. 72, no. 3, pp. 125–131. DOI: 10.3103/S0147687417030024.
32. Ho Q. T., Frantzen S., Nilsen B. M. et al. Congener-specific accumulation of persistent organic pollutants in marine fish from the Northeast Atlantic Ocean. *J. of Hazardous Materials*, 2023, vol. 457. 131758. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131758>.
33. Tang B., Luo X.-J., Zeng Y.-H. et al. Tracing the biotransformation of polychlorinated biphenyls (PCBs) in common carp (*Cyprinus carpio*): Enantiomeric fraction and compound-specific stable carbon isotope analyses. *Chemosphere*, 2016, vol. 159, pp. 449–456. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.06.053.
34. Winston G. W., Di Giulio R. T. Prooxidant and antioxidant mechanisms in aquatic organisms. *Aquatic Toxicology*, 1991, vol. 19 (2), pp. 137–161. DOI: 10.1016/0166-445X(91)90033-6.
35. Koenig S., Fernandez P., Company J. B. et al. Are deep-sea organisms dwelling within a submarine canyon more at risk from anthropogenic contamination than those from the adjacent open slope? A case study of Blanes canyon (NW Mediterranean). *Progress in Oceanography*, 2013, vol. 118, pp. 249–259. DOI: 10.1016/j.pocean.2013.07.016.
36. Дударев А. А., Душкина Е. В., Сладкова Ю. Н. и др. Стойкие органические загрязнители (СОЗ) в местных продуктах питания Печенгского района Мурманской области. — Токсиколог. вестн. — 2015, № 4. — С. 18–25.
- Dudarev A. A., Dushkina E. V., Sladkova Y. N. et al. Persistent organic pollutants (pops) in local food in the Pechenga district of the Murmansk region. *Toksikologicheskii vestnik*. [Toxicological Review] 2015, no. 4, pp. 18–25. (In Russian).
37. Цыганков В. Ю., Лукьянова О. Н. Современные уровни хлорорганических пестицидов в морских экосистемах дальневосточных морей. *Сиб. экол. журн.* — 2019. — № 6. — С. 688–703. — DOI: 10.15372/SEJ20190605.
- Tsygankov V. Yu., Lukyanova O. N. Current levels of organochlorine pesticides in marine ecosystems of Russian Far Eastern Seas. *Contemporary Problems of Ecology*, 2019, vol. 12, pp. 562–574. DOI: 10.1134/S199542551906009X.

Информация об авторах

Горбачева Елена Анатольевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Полярный филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (183038, Россия, Мурманск, ул. Академика Книповича, д. 6), e-mail: e.gorbacheva@pinro.vniro.ru.

Новиков Михаил Аркадьевич, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Полярный филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (183038, Россия, Мурманск, ул. Академика Книповича, д. 6), e-mail: mnovik@pinro.vniro.ru.

ORGANOCHLORINE COMPOUNDS IN ATLANTIC COD (*GADUS MORHUA*) AND PLAICE (*PLEURONECTES PLATESSA*) OF THE BARENTS SEA

Gorbacheva, E. A., Novikov, M. A.

Polar branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (Murmansk, Russian Federation)

The article was received on May 30, 2024

For citing

Gorbacheva E. A., Novikov M. A. Organochlorine compounds in Atlantic cod (*Gadus morhua*) and plaice (*Pleuronectes platessa*) of the Barents Sea. Arctic: Ecology and Economy, 2024, vol. 14, no. 4, pp. 562—574. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-4-562-574 (In Russian).

Abstract

This paper studies the content of organochlorine pesticides and PCBs in muscle and liver of Atlantic cod and plaice, caught in the Barents Sea in 2016-2022. Chromatograph mass spectrometry is used to detect the content of organochlorine compounds in fish. The concentrations of HCB, α -HCH, β -HCH, γ -HCH, *cis*-chlordane, *trans*-chlordane, and *trans*-nonachlor in fish tissues are quantified, along with DDT and its metabolites, as well as PCB congeners with numbers 28, 31, 52, 99, 101, 105, 118, 138, 153, 156 and 180. The average content of Σ HCHs, HCB, Σ DDTs and Σ PCBs in cod muscle is 0.7, 0.06, 0.81 and 1.0 ng/g, and their average content in plaice muscle is 2.3, 0.66, 2.3 and 3.5 ng/g of wet weight, respectively. In cod liver, the average content of Σ HCHs, HCB, Σ DDTs, Σ PCBs, Σ chlordanes is 3.3, 3.0, 36.8, 65.4 and 30.9 ng/g, and their average content in plaice liver is 4.6, 6.5, 19.1, 10.9 and 4.8 ng/g of wet weight, respectively. The studies show that in fish tissue α -HCH predominates in Σ HCHs, pp'-DDE — in Σ DDTs and PCB-118, PCB-138 and PCB-153 — in Σ PCBs. The accumulation of organochlorine compounds in fish tissue is found to be species-specific in terms of content level and ratio of HCH isomers, DDT isomers and metabolites, PCB congeners and chlordanes. The content of Σ HCHs, Σ DDTs and Σ PCBs in fish muscle and liver do not exceed the safe standards established for fish products.

Keywords: Barents Sea, pollution, polychlorinated biphenyls, organochlorine pesticides, ichthyofauna, cod, European plaice.

Information about the authors

Gorbacheva, Elena Anatolyevna, PhD of Biology, Researcher of Polar branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (6, Academician Knipovich St., Murmansk, Russia, 183038), e-mail: e.gorbacheva@pinro.vniro.ru.

Novikov, Mikhail Arkadyevich, PhD of Biology, Leading Researcher of Polar branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (6, Academician Knipovich St., Murmansk, Russia, 183038), e-mail: mnovik@pinro.vniro.ru.

© Gorbacheva E. A., Novikov M. A., 2024