










DOI 10.23859/estr-230110

EDN MLJLEB

УДК 57.044: 574.21: 574.632:574.64

Научная статья

Стойкие хлорорганические загрязняющие вещества в карповых рыбах озера Ханка (Спасский район, Приморский край)

М.М. Донец^{1, 2*} , С.И. Коженкова^{2, 3} , М.Д. Боярова¹ ,
Ю.П. Гумовская¹ , В.И. Кульшова¹ , А.Д. Боровкова^{1, 2} ,
В.Ю. Цыганков^{1, 2} 

¹ Дальневосточный федеральный университет, 690922, Россия, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, д. 10

² Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, 690041, Россия, г. Владивосток, ул. Радио, д. 7

³ Государственный природный биосферный заповедник «Ханкайский», 692245, Россия, Приморский край, г. Спасск-Дальний, ул. Ершова, д. 10

*maksim.donecz@mail.ru

Аннотация. Приведены концентрации хлорорганических пестицидов (ДДТ, ГХЦГ) и полихлорированных бифенилов (28, 52, 155, 101, 118, 143, 153, 138, 180, 207 конгенеры) в шести видах карповых рыб оз. Ханка. Хлорорганические соединения обнаружены во всех исследованных образцах. Доминирующей группой поллютантов были изомеры ГХЦГ, составляющие в среднем 70% от всех обнаруженных пестицидов. Доля α -ГХЦГ варьировала от 8 до 95%. Среди ДДТ и его метаболитов наиболее определяемым были *o,p'*- и *p,p'*-ДДЕ (в среднем – 10–100 и 15–100% соответственно). ПХБ во всех рыбах были представлены в основном низкохлорированными конгенерами – 28 и 52. По обнаруженным изомерам можно предположить давнее загрязнение оз. Ханка. Сравнение с водоемами южного Китая и Хорватии показало значительно более высокие уровни аккумуляции ГХЦГ и более низкие – ДДТ и ПХБ. При сравнении данных с требованиями нормативных документов России и Китая не выявлено случаев превышения допустимых концентраций.

Ключевые слова: СОЗ, ХОП, ПХБ, Cyprinidae, пресноводные экосистемы, бассейн р. Амур

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № FZNS-2023-0011).

Благодарности. Авторы выражают благодарность Е.В. Бруневской, сотруднику Государственного природного биосферного заповедника «Ханкайский», за помощь в отборе материала.

ORCID:

М.М. Донец, <https://orcid.org/0000-0002-2108-4448>

С.И. Коженкова, <https://orcid.org/0000-0002-8503-2006>

М.Д. Боярова, <https://orcid.org/0000-0003-0496-7000>

Ю.П. Гумовская, <https://orcid.org/0000-0002-5791-5493>

В.И. Кульшова, <https://orcid.org/0000-0001-5302-6157>

А.Д. Боровкова, <https://orcid.org/0009-0007-3285-822X>

В.Ю. Цыганков, <https://orcid.org/0000-0002-5095-7260>

Для цитирования: Донец, М.М. и др., 2024. Стойкие хлорорганические загрязняющие вещества в карповых рыбах озера Ханка (Спасский район, Приморский край). *Трансформация экосистем* 7 (3), 97–118. <https://doi.org/10.23859/estr-230110>

Поступила в редакцию: 10.01.2023

Принята к печати: 13.04.2023

Опубликована онлайн: 02.08.2024








DOI 10.23859/estr-230110

EDN MLJLEB

UDC 57.044: 574.21: 574.632:574.64

Article

Persistent organochlorine pollutants in cyprinids from the Lake Khanka (Spassky District, Primorsky Krai, Russia)

M.M. Donets^{1, 2*} , S.I. Kozhenkova^{2,3} , M.D. Boyarova¹ ,
Yu.P. Gumovskaya¹ , V.I. Kulshova¹ , A.D. Borovkova^{1, 2} ,
V.Yu. Tsygankov^{1, 2} 

¹ Far Eastern Federal University, Ajax 10, Vladivostok, Primorsky Krai, 690922 Russia

² Pacific Institute of Geography, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, ul. Radio 7, Vladivostok, Primorsky Krai, 690041 Russia

³ State Natural Biosphere Reserve "Khankaisky", ul. Ershova 10, Spassk-Dalniy, Primorsky Krai, 692245 Russia

*maksim.donecz@mail.ru

Abstract. Present study provides data of organochlorine pesticides (DDT, HCH) and polychlorinated biphenyls (28, 52, 155, 101, 118, 143, 153, 138, 180, 207 congener) content in six carp fish from Lake Khanka. Organochlorine compounds are found in all studied samples. HCHs isomers were dominant, constituting on average 70% of all pesticides detected. α -HCH content varied from 8 to 95%. Among DDTs, *o,p'*- and *p,p'*-DDE were predominant (on average 10–100 and 15–100%, respectively). PCBs content in all fish samples was primarily presented by low-chlorinated 28 and 52 congeners. Detected isomers evidence on the long-term pollution of Lake Khanka by persistent organic pollutants. Compare to southern China and Croatia, fish from Lake Khanka showed significantly higher levels of accumulation of HCH and lower levels of DDT and PCB. When comparing the data with the requirements of regulatory documents in Russia and China, no cases of exceeding maximum permissible concentrations were identified.

Keywords: OCPs, POPs, PCBs, Cyprinidae, freshwater ecosystems, Amur River basin

Funding. The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state assignment no. FZNS-2023-0011).

Acknowledgements. The authors express their sincere gratitude to E.V. Brunevskaya for invaluable assistance in sampling.

ORCID:

M.M. Donets, <https://orcid.org/0000-0002-2108-4448>

S.I. Kozhenkova, <https://orcid.org/0000-0002-8503-2006>

M.D. Boyarova, <https://orcid.org/0000-0003-0496-7000>

Yu.P. Gumovskaya, <https://orcid.org/0000-0002-5791-5493>

V.I. Kulshova, <https://orcid.org/0000-0001-5302-6157>

A.D. Borovkova, <https://orcid.org/0009-0007-3285-822X>

V.Yu. Tsygankov, <https://orcid.org/0000-0002-5095-7260>

To cite this article: Donets, M.M. et al., 2024. Persistent organochlorine pollutants in cyprinids from the Lake Khanka (Spassky District, Primorsky Krai, Russia). *Ecosystem Transformation* 7 (3), 97–118. <https://doi.org/10.23859/estr-230110>

Received: 10.01.2023

Accepted: 13.04.2023

Published online: 02.08.2024

Введение

Глобальность процессов, происходящих в природе, требует международного сотрудничества в области охраны окружающей среды. В результате подобного взаимодействия между странами подписываются соглашения и формируются трансграничные охраняемые территории (Petrova et al., 2019). Примером такого сотрудничества является озеро Ханка, чья территория с 1996 г. получила статус трансграничного международного российско-китайского заповедника.

Озеро Ханка – крупнейший пресноводный водоем северо-восточной Азии. Особенности его расположения и климата во многом обуславливают продуктивность местных экосистем, их биологическое и генетическое разнообразие (Коженкова, 2017). С середины XX в. Приханкайская равнина стала одним из основных сельскохозяйственных районов Дальнего Востока России и провинции Хэйлуцзян в Китае. Однако в ходе экономического кризиса 1990 г. антропогенная нагрузка на этот регион значительно снизилась после закрытия многих сельскохозяйственных предприятий со стороны Российской Федерации. С 2000 г. активность человека на прилегающей к водоему территории возросла. На воды озера влияет как сельское хозяйство, так и деятельность местного населения (формирование свалок, рыболовство, воздействие сточных и бытовых вод, стоянка и проезд автотранспорта), численность которого по данным 2017 г. составило суммарно 605.8 тыс. чел. (Егидарев и др., 2019; Цыбринская, 2009).

В настоящее время экосистема оз. Ханка уже не может справляться с детоксикацией поступающих объемов ксенобиотиков. Основной урон наносится за счет неконтролируемого применения пестицидов, а также их неправильного хранения. В 2020 г. в водах озера обнаружены значительные концентрации запрещенных к применению хлорорганических пестицидов (ХОП) – изомеры гексахлорциклогексана (ГХЦГ), дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ) и его метаболиты (ДДД и ДДЕ), гексахлорбензол и др. При этом отмечается, что ДДТ поступил в экосистему озера недавно (Лягуша и Черняев, 2020). Однако данные о содержании ХОП в биоте этого водоема практически отсутствуют, что затрудняет отслеживание динамики концентраций запрещенных соединений. В связи с этим возникает опасность для устойчивости местной экосистемы и здоровья жителей побережья.

Цель работы – определить уровни хлорорганических пестицидов (ДДТ и ГХЦГ) и полихлорированных бифенилов (ПХБ) в органах различных видов карповых рыб оз. Ханка.

Материалы и методы

Исследовались рыбы шести видов семейства Карповые (Cyprinidae): карась серебряный *Carassius gibelio* (Bloch, 1782), амурский сазан *Cyprinus rubrofuscus* Lacepède, 1803, горбушка *Chanodichthys oxucephalus* (Bleeker, 1871), уссурийская востробрюшка *Hemiculter lucidus* (Dybowski, 1872), монгольский краснопер *Chanodichthys mongolicus* (Basilewsky, 1855) и верхогляд *Chanodichthys erythropterus* (Basilewsky, 1855) (Табл. 1). Материалы отбирались в 2018 г. в ходе экспедиции Тихоокеанского института географии (ТИГ ДВО РАН) в оз. Ханка в районе с. Новосельское (Рис. 1). Рыбу отлавливали на глубине 1–2 м при помощи удочек. Выловленных особей измеряли, взвешивали и замораживали без разделения на органы, после чего транспортировали в ТИГ ДВО РАН. Перед разделкой рыбу обмывали дистиллированной водой и препарировали без размораживания. Далее пробы хранились в морозильной камере до химического анализа на содержание стойких органических загрязняющих веществ (СОЗ).

Органы гомогенизировались до состояния однородной кашицы. СОЗ экстрагировались из гомогенатов смесью гексан-ацетон с последующим разрушением соэкстрактивных компонентов (липидов) концентрированной серной кислотой и разделялись на полярную (ХОП) и неполярную (ПХБ) фазы на хроматографических колонках с использованием активированного сорбента Florisil® 100–200 меш (Donets et al., 2021a, b). Для анализа применяли стандартные образцы (Dr. Ehrenstorfer и AccuStandard) исследуемых соединений (α -ГХЦГ, β -ГХЦГ, γ -ГХЦГ, δ -ГХЦГ, p,p' -ДДТ, p,p' -ДДД, p,p' -ДДЕ, o,p' -ДДТ, o,p' -ДДД, o,p' -ДДЕ, дильдрин, эндрин и смесь конгенов ПХБ (28, 52, 155, 101, 118, 143, 153, 138, 180, 207)), с установленными метрологическими характеристиками согласно калибровочному графику, построенному на основе стандартных растворов.

Определение содержания ХОП и ПХБ в образцах выполняли на газовом хроматографе Shimadzu GC-2010 Plus с детектором электронного захвата ECD. Капиллярная колонка Shimadzu HiCap CBP 5 (длина колонки 25 м, внутренний диаметр 0.32 мм, толщина фазы 0.5 мкм). Хроматограф калибровали по стандартным растворам СОЗ. Идентификацию проводили по относительному времени удерживания. Количественное определение осуществляли методом внутреннего стандарта, используя стандартные смеси пестицидов (Tsygankov and Boyarova, 2015).

Статистический анализ результатов выполняли с помощью программного обеспечения IBM SPSS Statistics для ОС Windows 10. Достоверность данных оценивали с помощью двустороннего критерия Краскела–Уоллиса с уровнем значимости $p \leq 0.05$. При проведении сравнительного анализа и построении диаграмм не учитывались значения, превышающие трехкратное стандарт-

Табл. 1. Размерно-возрастные характеристики исследованных объектов. Над чертой указан диапазон концентраций, под чертой – среднее \pm стандартное отклонение.

Вид	Длина (АВ), см	Вес, г	Возраст, лет	N, экз.
Серебряный карась	25.0–34.0	310–560	4–7	19
	29 \pm 3	465 \pm 84		
Амурский сазан	44.2–53.3	1375–2215	6–8	14
	47 \pm 4	1525 \pm 409		
Уссурийская востробрюшка	21.5–24.7	60–90	7–8	6
	23 \pm 2	72 \pm 16		
Горбушка	27.5–34.2	165–335	7–10	15
	31 \pm 3	240 \pm 63		
Монгольский краснопер	43.5–51.0	630–1235	7–10	15
	47 \pm 3	877 \pm 243		
Верхогляд	50.8–65.0	885–2000	7–8	10
	56 \pm 8	1260 \pm 640		

Табл. 2. Концентрации ХОП в карповых рыбах оз. Ханка (среднее \pm стандартное отклонение), нг/г сырой массы. * – обнаружено в одном образце; < ПО – концентрация ниже пределов обнаружения оборудования.

Вид	Орган/ткань	Изомеры ГХЦГ			
		α -	β -	γ -	δ -
Серебряный карась	Мышцы	0.87 \pm 0.87	1.6 \pm 2.5	1.5 \pm 1.7	0.53 \pm 0.59
	Печень	3.2 \pm 2.2	0.98 \pm 0.60	0.59 \pm 0.34	0.37 \pm 0.35
	Икра	19.9 \pm 34.4	5.6 \pm 10.8	1.8 \pm 3.1	6.8 \pm 8.5
Амурский сазан	Мышцы	1.34 \pm 0.86	0.73 \pm 0.87	0.26 \pm 0.15	0.69 \pm 0.83
	Печень	3.5 \pm 2.4	0.97 \pm 0.55	0.51 \pm 0.33	1.1 \pm 1.3
	Икра	2.6 \pm 18.2	13.7*	< ПО	0.29 \pm 0.45
	Молоки	0.38 \pm 0.03	0.28*	0.17 \pm 0.06	0.16 \pm 0.02
Уссурийская востробрюшка	Мышцы	< ПО	< ПО	0.88*	< ПО
Горбушка	Мышцы	2.1 \pm 3.4	0.44 \pm 0.15	0.37 \pm 0.17	0.58 \pm 0.53
	Печень	33.6 \pm 30.3	4.8 \pm 5.2	5.2 \pm 5.7	2.8*
Монгольский краснопер	Мышцы	1.2 \pm 1.8	0.35*	0.49 \pm 0.32	0.49 \pm 0.36
	Печень	6.1 \pm 4.9	0.36 \pm 0.08	0.46 \pm 0.08	0.61*
	Икра	0.85*	0.29*	0.24 \pm 0.07	< ПО
	Жир	13.1 \pm 13.0	1.7 \pm 1.3	1.21 \pm 0.79	0.87*
Верхогляд	Мышцы	1.4 \pm 1.6	1.6 \pm 1.2	1.6 \pm 1.9	0.17*
	Печень	16.2 \pm 22.0	0.93 \pm 0.68	0.74*	3.0*
	Молоки	3.6 \pm 4.6	0.73 \pm 0.56	0.69 \pm 0.25	0.24*
	Жир	4.1 \pm 4.2	7.0 \pm 9.1	0.37*	0.23 \pm 0.15

Изомеры ДДТ		Изомеры ДДД		Изомеры ДДЕ		Дильдрин	Эндрин
<i>o,p'</i> -	<i>p,p'</i> -	<i>o,p'</i> -	<i>p,p'</i> -	<i>o,p'</i> -	<i>p,p'</i> -		
< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	0.46 ± 0.61	0.61 ± 0.30	< ПО	0.25*
< ПО	< ПО	0.11*	< ПО	0.53 ± 0.32	0.20 ± 0.08	< ПО	< ПО
< ПО	< ПО	< ПО	0.29*	0.63 ± 0.70	0.93*	< ПО	4.4*
< ПО	< ПО	< ПО	0.57 ± 0.20	0.24 ± 0.17	0.45 ± 0.29	< ПО	< ПО
< ПО	3.9*	< ПО	< ПО	0.76*	< ПО	< ПО	< ПО
14.8*	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО
< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	0.12*	< ПО	< ПО	< ПО
< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	0.45 ± 0.27	< ПО	< ПО	< ПО
< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	0.30 ± 0.21	0.70*	< ПО	< ПО
< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	32.9*	< ПО	< ПО	< ПО
< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	0.38 ± 0.2	< ПО	< ПО	< ПО
< ПО	< ПО	< ПО	0.97 ± 1.12	0.50*	0.20*	< ПО	< ПО
< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	0.79*	< ПО	< ПО	< ПО
< ПО	< ПО	1.04 ± 0.11	3.89 ± 0.85	< ПО	2.9*	< ПО	< ПО
0.45*	< ПО	< ПО	< ПО	0.34 ± 0.18	0.51*	< ПО	< ПО
< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	0.99*	< ПО	< ПО
< ПО	1.4*	< ПО	< ПО	2.9*	1.8*	< ПО	< ПО
< ПО	< ПО	1.6*	2.2*	0.68*	25.7*	< ПО	< ПО

Табл. 3. Концентрации конгенов ПХБ в карловых рыбах оз. Ханка (среднее \pm стандартное отклонение), нг/г сырой массы. * – обнаружено в одном образце; < ПО – концентрация ниже пределов обнаружения оборудования.

Вид	Орган/ ткань	ПХБ 28	ПХБ 52	ПХБ 155	ПХБ 101	ПХБ 118	ПХБ 143	ПХБ 153	ПХБ 138	ПХБ 180
Серебряный карась	Мышцы	1.8 \pm 2.0	0.75 \pm 0.07	< ПО	0.31*	< ПО	< ПО	2.7*	< ПО	< ПО
	Печень	0.43 \pm 0.15	0.25 \pm 0.13	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО
	Икра	1.0 \pm 1.6	0.24 \pm 0.19	< ПО	0.50*	0.16*	< ПО	< ПО	0.13*	< ПО
Амурский сазан	Мышцы	0.48 \pm 0.22	0.51 \pm 0.20	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	0.24*	< ПО	< ПО
	Печень	0.90 \pm 0.40	0.24*	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО
	Икра	< ПО	0.20 \pm 0.17	0.38*	< ПО	0.40*	0.14*	< ПО	< ПО	0.13*
	Молоки	0.13*	0.5*	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО
Уссурийская востробрюшка	Мышцы	0.29 \pm 0.30	0.50 \pm 0.16	< ПО	< ПО	0.49 \pm 0.23	< ПО	< ПО	0.46 \pm 0.48	< ПО
Горбушка	Мышцы	0.51 \pm 0.28	0.46 \pm 0.30	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО
	Печень	1.8*	2.3*	< ПО	< ПО	1.4*	< ПО	2.0*	2.3*	< ПО
Монгольский краснопер	Мышцы	0.25 \pm 0.02	0.74 \pm 0.32	< ПО	< ПО	0.51*	< ПО	0.45*	< ПО	< ПО
	Печень	1.5*	0.39*	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО
	Икра	0.49*	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО
	Жир	3.17 \pm 0.02	1.15 \pm 0.81	< ПО	1.03 \pm 0.13	1.54 \pm 0.69	1.73*	2.18 \pm 0.73	2.3 \pm 0.5	< ПО
Верхогляд	Мышцы	0.23*	0.43 \pm 0.23	< ПО	< ПО	0.89*	< ПО	0.33*	0.27*	< ПО
	Печень	0.81 \pm 0.45	1.5 \pm 1.3	< ПО	0.65*	1.3*	< ПО	3.20*	1.3*	< ПО
	Молоки	1.7*	0.54*	< ПО	< ПО	< ПО	< ПО	1.80*	1.7*	< ПО
	Жир	1.43 \pm 0.78	1.08 \pm 0.57	< ПО	2.8 \pm 1.4	5.7 \pm 1.4	< ПО	4.2 \pm 4.3	8.77 \pm 0.49	< ПО

Серебряный карась

У карася серебряного проанализированы мышцы, печень и икра (Рис. 2). Среди ГХЦГ обнаружены все исследованные формы соединения с преобладанием β - и γ -изомеров. ДДТ был представлен исключительно в виде ДДЕ. В мышцах и икре единично обнаружен эндрин. Среди ПХБ определялись наиболее низкохлорированные конгенеры – 28 и 52.

При анализе данных нами не обнаружено статистически значимых различий между концентрациями поллютантов в органах и тканях серебряного карася (как индивидуальными, так и суммарными), что, вероятно, связано с довольно большими вариациями концентраций. Тем не менее, можно выделить тенденцию к большей аккумуляции ГХЦГ в печени, а также ДДТ и ПХБ в мышцах. Вероятно, ГХЦГ является основным токсикантом, поступающим в организм рыбы.

Амурский сазан

У амурского сазана проанализированы мышцы, печень, икра и молоки (Рис. 3). Большую часть всех обнаруженных СОЗ составляли изомеры ГХЦГ с преобладанием наиболее устойчивых α - и β -форм. ДДТ и его метаболиты были представлены в основном o,p' - и p,p' -изомерами ДДЕ и ДДД, которые обнаружены преимущественно в мышцах рыбы. В единичных случаях зафиксирован оригинальный ДДТ в печени и икре.

Статистический анализ не показал достоверных различий в концентрациях исследованных поллютантов в органах амурского сазана, однако существует тенденция к более высокой аккумуляции ГХЦГ в икре и ДДТ – в печени. Распределение ПХБ по органам было достаточно однородным в парах мышцы–печень и икра–молоки.

Уссурийская востробрюшка

У востробрюшки анализировались мышцы. Среди ХОП обнаружен только o,p' -ДДЕ и γ -ГХЦГ (линдан) (в одном образце). ПХБ показали большую неоднородность качественного состава – наряду с низкохлорированными 28 и 52 конгенерами обнаружены ПХБ 118 и 138. Для востробрюшки статистический анализ не проводился в связи с исследованием только одного типа органов.

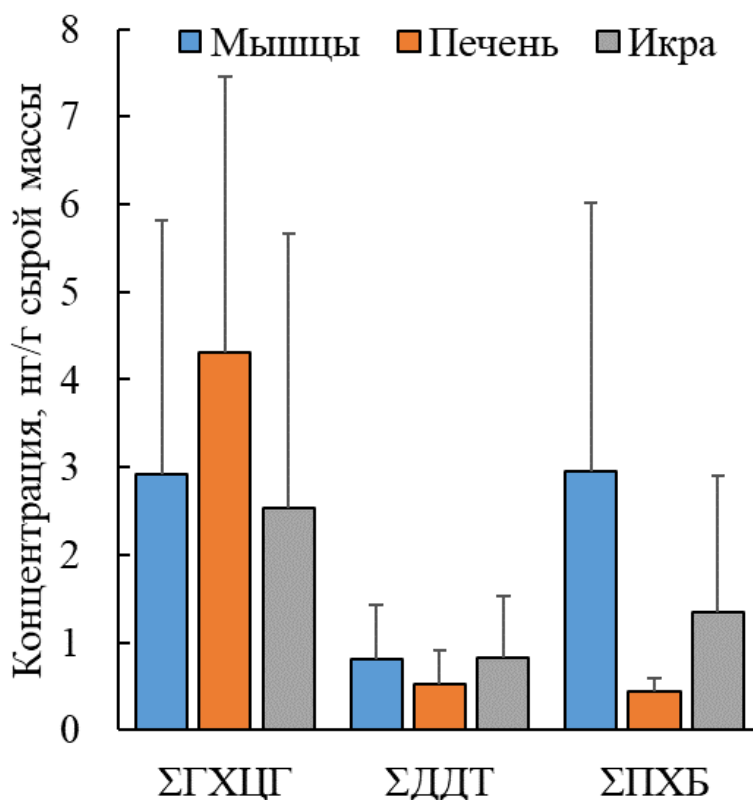


Рис. 2. Средние концентрации СОЗ в органах серебряного карася (здесь и далее: вертикальная планка – стандартное отклонение).

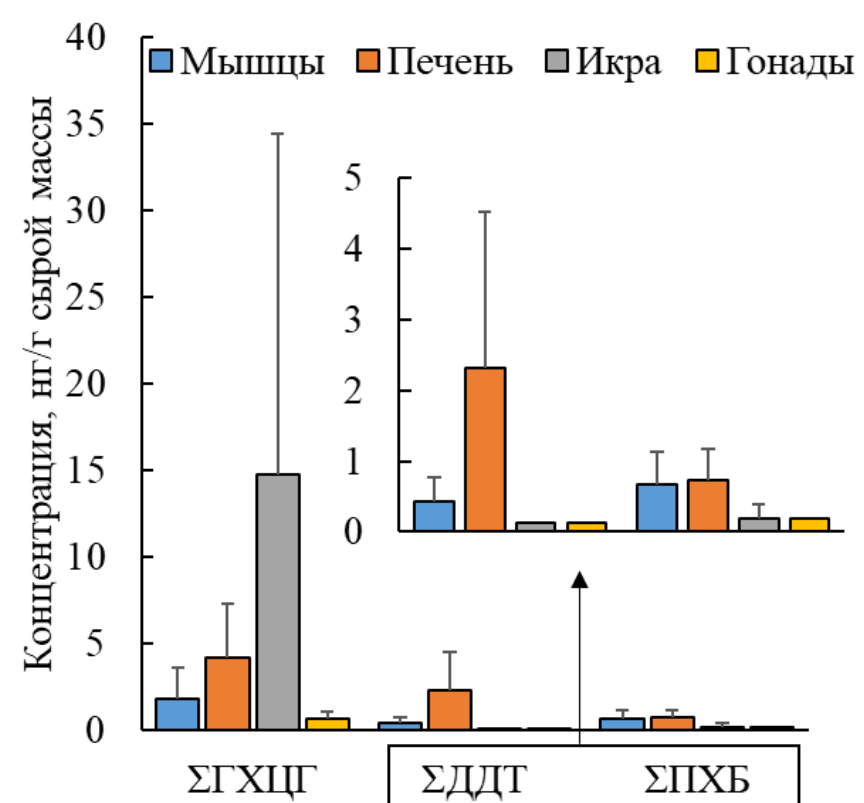


Рис. 3. Средние концентрации CO3 в органах амурского сазана.

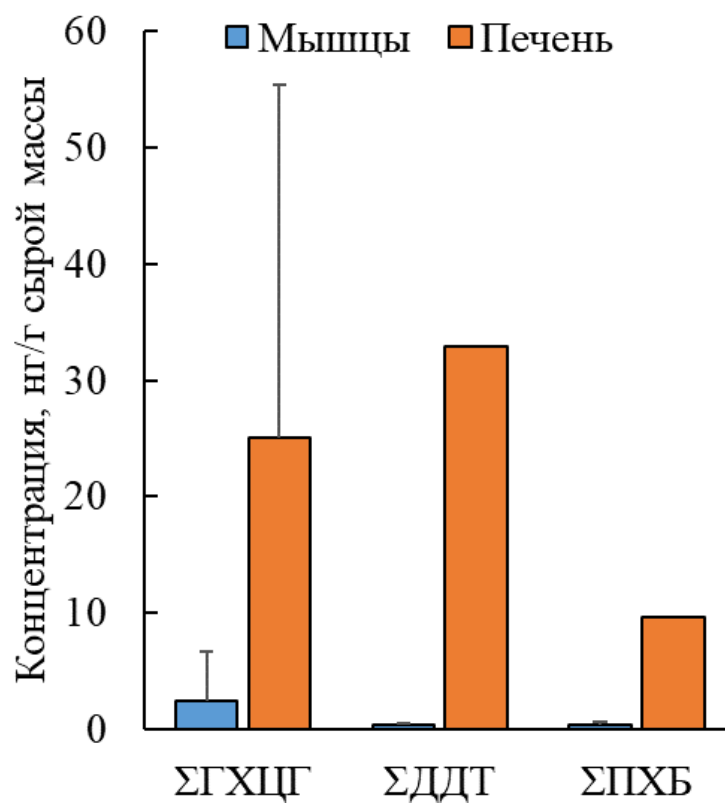


Рис. 4. Средние концентрации CO3 в органах горбушки.

Горбушка

У горбушки на анализ отобраны мышцы и печень; в обоих органах доминировал ГХЦГ (Рис. 4). Среди его изомеров преобладала α -форма. ДДТ в мышцах и печени практически полностью был представлен в виде o,p' -ДДЕ. Среди ПХБ в мышцах преимущественно обнаружен 28 конгенер, в печени – лишь отдельные представители этих поллютантов (все в одном образце).

В печени горбушки суммарное содержание α -, β - и γ -ГХЦГ было достоверно ($p \leq 0.05$) выше, чем в мышцах (Рис. 4). Для остальных поллютантов наблюдалась лишь аналогичная тенденция. Стоит также отметить кратное превосходство суммарных концентраций ГХЦГ в печени горбушки по сравнению с другими рыбами.

Монгольский краснопер

У краснопера монгольского проанализированы мышцы, печень, икра и висцеральный жир (Рис. 5). Для всех исследованных органов характерно преобладание α -ГХЦГ над другими формами соединения. В мышцах среди метаболитов ДДТ обнаружен только ДДЕ, в печени и жире – ДДД и ДДЕ, в икре – o,p' -ДДЕ (единично). Как и во всех исследованных видах, ПХБ в краснопере были представлены преимущественно 28 и 52 конгенерами, за исключением жира. Наиболее широкий состав и наивысшие концентрации токсикантов обнаружены в висцеральном жире, содержащим большое количество липидов (Рис. 5).

Несмотря на вариативный состав поллютантов в исследованных органах монгольского краснопера, достоверных различий в концентрациях ксенобиотиков не обнаружено. Существует лишь тенденция в повышении концентраций токсикантов в ряду жир > печень > икра ~ мышцы.

Верхогляд

У верхогляда на анализ отбирались мышцы, печень, молоки и висцеральный жир (Рис. 6). Среди форм ГХЦГ преобладал α -изомер. Уровни β - и γ -ГХЦГ были сопоставимы в мышцах и молоках; кроме того, γ -форма единично определена в печени, что может говорить о хроническом воздействии поллютантов на этих рыб. Среди ДДТ и его метаболитов чаще определялись продукты распада изначального соединения (ДДД, ДДЕ).

В органах верхогляда не обнаружено достоверных различий между концентрациями поллютантов. Наблюдалась тенденция к большей аккумуляции ДДТ и ПХБ в жире этой рыбы, ГХЦГ – в жире и печени (Рис. 6).

Обсуждение результатов

Различия в накоплении СОЗ у исследованных рыб

C. gibelio – типичный эврифаг, широко распространенный по всему миру. Этот вид устойчив к экстремальным условиям, например низкому уровню кислорода, повышенной кислотности и т.д. (Промысловые рыбы СССР, 1949; Erdogan et al., 2014; De Giosa et al., 2014). В случае высокой конкуренции за конкретный пищевой ресурс карась способен менять свою пищевую специализацию (*Carassius gibelio*, 2021). Обычно этот вид питается преимущественно детритом и бентосом (Бугаев, 2007), что может способствовать более высокой аккумуляции СОЗ в организме рыб при сопутствующем заглатывании донных осадков.

Сазан и карась наиболее близки по своим биологическим характеристикам. Эти виды очень сходны по типу и объектам питания и являются конкурентами. Значительную долю в спектре питания сазана занимают бентосные организмы, в особенности личинки хирономид (Бурик, 2010). Кроме того, сазан предпочитает мягкие илистые грунты, насыщенные органическим веществом и хорошо сорбирующие поллютанты. Таким образом, вероятным источником поступления СОЗ в организм сазана также является сопутствующее заглатывание загрязненных частиц ила в процессе питания.

Уссурийская востробрюшка практически не вылавливается в России. При этом в Китае близкородственные ей виды являются важным объектом коммерческой ловли. Основу ее питания составляют мелкие рачки, моллюски, личинки насекомых, поденки, семена растений и сине-зеленые водоросли (Промысловые..., 1949). Все указанные организмы благодаря своему короткому жизненному циклу мало подвержены воздействию СОЗ, длительно циркулирующих в среде. Соответственно, они накапливают поллютанты, попавшие в воду за счет атмосферного переноса или недавно использованные. При этом токсиканты, поступающие в экосистему, оседают на орга-

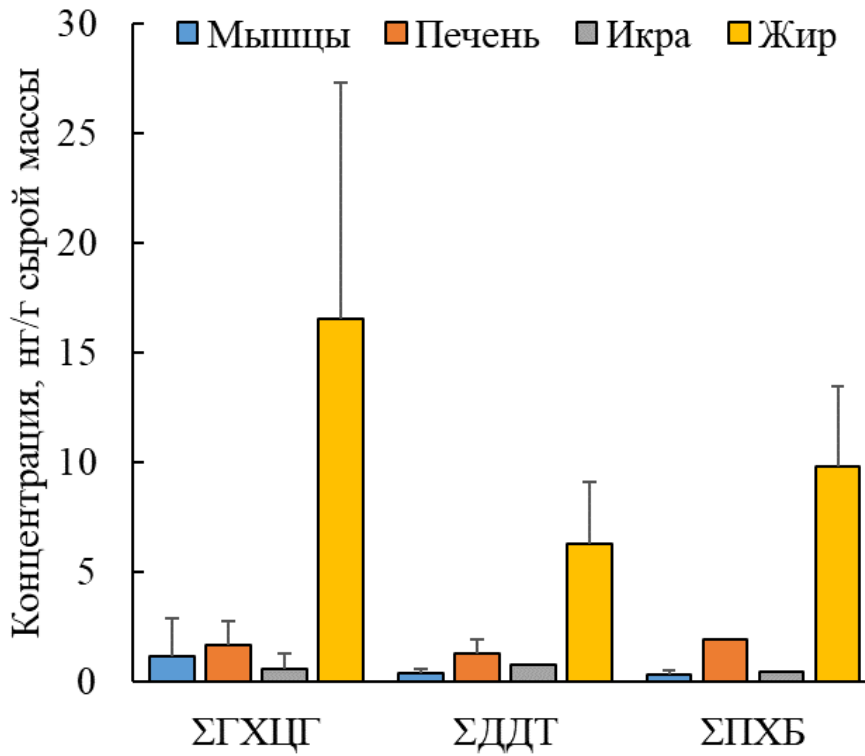


Рис. 5. Концентрации CO₃ в органах монгольского краснопера.

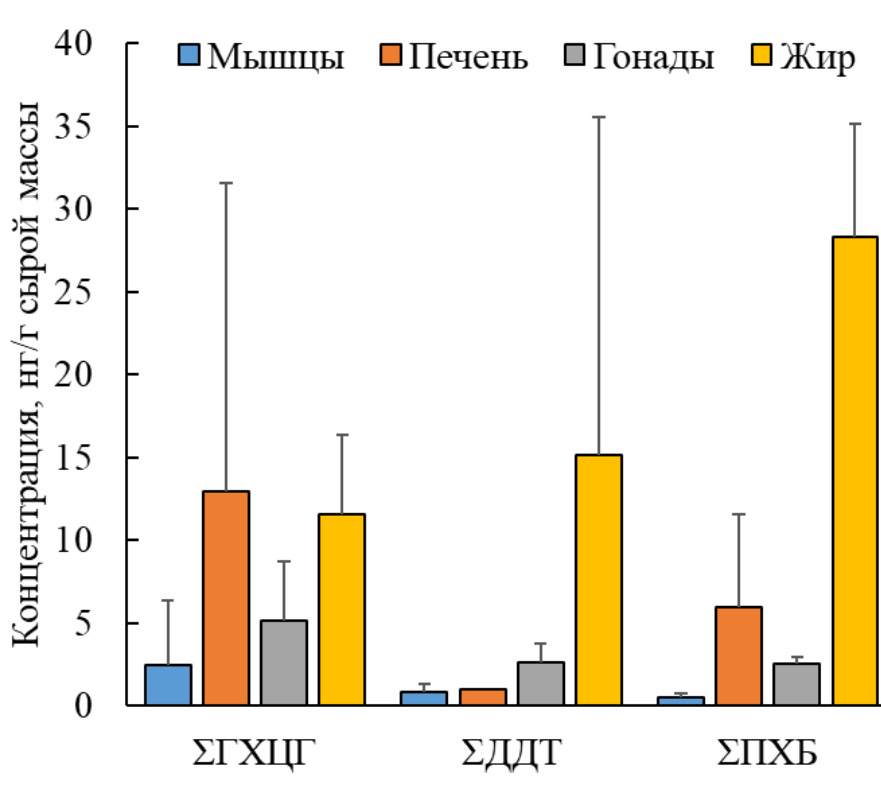


Рис. 6. Средние концентрации CO₃ в органах верхогляда.

нических частицах (и впоследствии заглатываются) либо сорбируются на поверхности объектов питания востробрюшки. Благодаря своим экологическим особенностям эта рыба обитает преимущественно в пелагиали водоема, что существенно снижает контакт с загрязненными донными отложениями (в отличие от карася и сазана). На это указывают низкие уровни СОЗ в мышцах востробрюшки и их качественный состав (*o,p'*-ДДЕ, отдельные конгенеры ПХБ). Вероятно, атмосферный перенос не оказывает существенного влияния на содержание СОЗ в оз. Ханка.

Горбушка – типичный хищник. Основу ее питания составляют креветки, мизиды, дафнии и мелкая рыба (в особенности востробрюшка) (Рыбы пресных вод..., 1949). Таким образом, она не находится в тесном контакте с донными осадками, а накопление поллютантов происходит за счет биомагнификации – процесса увеличения концентрации химического вещества в тканях организмов по трофической цепи (в первую очередь при поедании одного организма другим) (Anderson et al., 2008). В результате этого явления фактические уровни накопления поллютантов превышают ожидаемые в конкретных условиях (Alexander, 1999), а токсиканты снова и снова вовлекаются в круговорот веществ в экосистеме даже без внесения извне (за счет высвобождения поллютантов из тушек погибших рыб).

Как и большинство представителей рода *Chanodichthys*, монгольский краснопер является хищником, основу питания которого составляют рачки, мелкая рыба и икра других карповых (особенно сазана). По достижении 5-летнего возраста переходит на питание исключительно рыбой (Промысловые..., 1949). В органах этих рыб (наряду с верхоглядом) обнаружен наиболее широкий спектр исследованных соединений (в особенности в висцеральном жире), что отражает склонность СОЗ к биомагнификации.

По спектру питания верхогляд очень схож с краснопером и охотится в основном на мальков других рыб. Обнаруженные в нем поллютанты показали наибольшее качественное разнообразие, в особенности среди конгенов ПХБ.

При сравнении уровней ксенобиотиков во всех исследованных рыбах нами выявлена лишь тенденция к большей аккумуляции ПХБ в мышцах карася и ГХЦГ в печени горбушки (Рис. 7). СОЗ могут попадать в экосистемы различными путями. При этом их качественный состав будет зависеть от источника, что позволяет различать недавнее использование и вторичное загрязнение за счет длительной циркуляции поллютантов (в том числе в рамках атмосферного переноса). В случае недавнего попадания ГХЦГ в экосистему доминирующей формой соединения будет линдан (γ -ГХЦГ). В процессе своей деградации это вещество проходит череду превращений одних изомеров в другие ($\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \delta \rightarrow \beta$) для повышения стабильности в экосистеме (Lu et al., 2019). Таким образом, соотношение концентраций продуктов распада и изначального соединения может указывать на давность циркуляции поллютанта в среде. В случае исследованных нами рыб отношение (α -+ β -ГХЦГ)/ γ -ГХЦГ больше единицы, что указывает на давность поступления этого пестицида. ДДТ является основным действующим веществом в пестицидных препаратах на его основе (Saadati et al., 2012). Под действием аэробных условий это соединение превращается в ДДЕ, в анаэробных – ДДД (который также может трансформироваться в ДДЕ) (Huang et al., 2018). Соотношение (ДДД+ДДЕ)/ДДТ в исследованных образцах больше единицы, что говорит о длительной циркуляции этого токсиканта.

Таким образом, качественный и количественный состав СОЗ в органах рыб в 2018 г. в оз. Ханка продемонстрировал только индикаторы давнего загрязнения ХОП. Единичное обнаружение «материнских» соединений СОЗ не указывает на существование источников поступления оригинальных препаратов в экосистему озера.

Возможные источники поступления СОЗ в воды оз. Ханка

Проведенное в 2020 г. исследование качества вод оз. Ханка показало, что диапазоны концентраций γ -ГХЦГ и ДДТ составили 24.9–49.6 и 3.0–14.9 нг/л (при допустимом содержании 1 и 10 нг/л соответственно) (Лягуша и Черняев, 2020). В случае ГХЦГ отмечается давность поступления в экосистему, в то время как ДДТ, вероятнее всего, может применяться в настоящее время, несмотря на ратификацию Стокгольмской конвенции¹ Россией и Китаем. Кроме того, в реках, питаю-

¹ UNEP, 2001. Stockholm Convention on persistent organic pollutants. Интернет-ресурс. URL: <http://chm.pops.int/> (дата обращения: 13.05.2020).

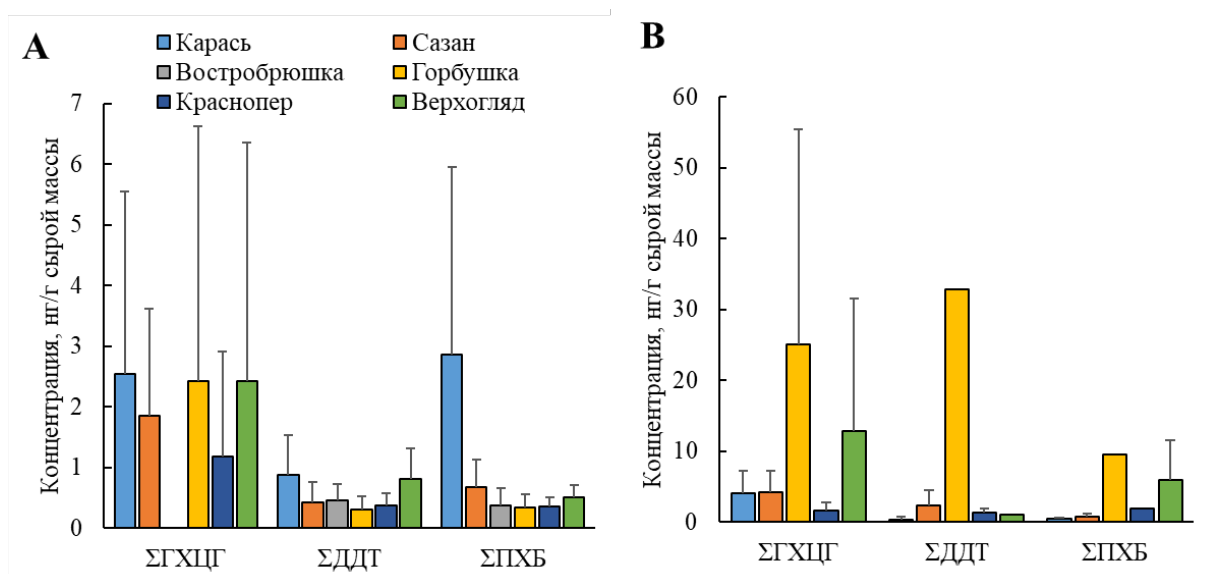


Рис. 7. Сравнение средних суммарных концентраций СОЗ в мышцах (А) и печени (В) исследованных рыб.

ших озеро, обнаружено серьезное превышение допустимых уровней ДДТ и ГХЦГ: например, в р. Астраханка – в 315 и 38 раз соответственно. В отличие от оз. Ханка, поступление ГХЦГ в реку считается недавним и может указывать на утечку этого запрещенного соединения из хранилищ или его намеренное использование в сельском хозяйстве. Отмечается также беспрепятственное поступление воды с обрабатываемых территорий в речную сеть, питающую озеро. В результате в отдельных реках, входящих в бассейн оз. Ханка, среди метаболитов ДДТ обнаруживается только исходное соединение в диапазоне концентраций от 43.7 до 61.9 нг/л. В то же время информация о содержании ХОП в северной части озера (китайская территория) фактически отсутствует.

Провинция Хэйлуцзян – один из основных регионов выращивания риса в Китае. При этом основное производство сельскохозяйственной продукции ведется здесь небольшими фермерскими хозяйствами, самостоятельно принимающими решение о высаживаемых культурах и способах обработки. Это способствует применению запрещенных пестицидов за счет передачи знаний от старшего поколения (еще заставших активное применение ХОП) (Yang et al., 2007). Современные работы китайских авторов (Hu et al., 2019) отмечают значительный переизбыток применяемых пестицидов, но не конкретизируют их качественный состав. В среднем внесение пестицидов для выращивания риса в северо-восточном Китае больше необходимого в 1.2–2.3 раза (Sun et al., 2020). Таким образом, ДДТ и ГХЦГ потенциально могут применяться в домашних хозяйствах фермеров провинции Хэйлуцзян и поступать в воды оз. Ханка.

Во всех пробах исследованных нами рыб среди полихлорированных бифенилов доминировали низкохлорированные конгенеры: 28 и 52. Это может указывать на преимущественное поступление ПХБ в результате навигационной деятельности различных судов (UNEP, 2001; Urbaniak, 2007). Более высокохлорированные конгенеры вносят незначительный вклад в общее загрязнение СОЗ оз. Ханка и, вероятнее всего, практически не поступают в водоем.

Сравнение концентраций СОЗ в органах рыб с другими регионами мира

При сравнении уровней ХОП в мышцах исследованных рыб с другими регионами видно, что рыбы оз. Ханка имеют значительно более высокие уровни ГХЦГ (за исключением озера Дяньшань (Китай), подверженного существенному воздействию СОЗ за счет смешанного загрязнения из-за сброса промышленных и бытовых, сельскохозяйственных стоков, аквакультуры и судового транспорта) (Yang et al., 2019) (Табл. 4). При этом содержание ДДТ в среднем ниже относительно других стран (Wang et al., 2012; Yang et al., 2019; Yu et al., 2012; Zhang et al., 2014).

Высокие уровни аккумуляции ДДТ в рыбах южного Китая могут объясняться его использованием для контроля переносчиков опасных заболеваний (малярия, тиф, чесотка), широким применением этого пестицида для уничтожения сельскохозяйственных вредителей и производством на территории страны в прошлом (Grung et al., 2015; Li et al., 2018).

Высокая аккумуляция ГХЦГ в рыбах из оз. Ханка может быть связана с более активным (по сравнению с другими регионами) использованием этого пестицида в юго-восточной части России и северо-западной части Китая. Стоит отметить, что на восточном побережье Евразии и в прилегающих морях уровни ГХЦГ (в среднем) выше, чем ДДТ, что может отражать последствия глобального атмосферного переноса и физико-химические особенности этих пестицидов (Donets et al., 2021a, b; Lukanova et al., 2018; Tsygankov et al., 2016).

Средние концентрации полихлорированных бифенилов в карасе и сазане оз. Ханка выше, чем в близкородственных видах оз. Тайху (Китай) (Wang et al., 2012; Yu et al., 2012) и Враньско-го (Хорватия) (Romanić et al., 2018) и ниже, чем в оз. Дяньшань (Китай) (Yang et al., 2019). Для остальных исследованных нами видов концентрации ПХБ были ниже, чем в других регионах. Можно предположить, что в изученном регионе ПХБ поступают в крайне ограниченном количестве, а их основным источником выступают донные осадки.

Табл. 4. Средние концентрации СОЗ в мышцах карповых рыб различных озер. ¹ Сумма α -, β - и γ -ГХЦГ; ² сумма p,p' -ДДЕ, p,p' -ДДД и p,p' -ДДТ; ³ сумма индикаторных ПХБ (28, 52, 101, 138, 153, 180); «–» – нет данных.

Вид	Водоем	Год отбора	Концентрация, нг/г сырой массы			Ссылка
			Σ ГХЦГ	Σ ДДТ	Σ ПХБ	
Обыкновенный карась	Оз. Тайху	2009	0.77	9.75	1.08	Wang et al., 2012; Yu et al., 2012
Серебряный карась	Оз. Враньское	2014	0.19 ¹	0.87 ²	1.15 ³	Romanić et al., 2018
	Оз. Ханка	2018	2.92	0.81	2.95	Наши данные
Золотая рыбка	Оз. Наньсыху	2011	1.90	2.61	–	Zhang et al., 2014
	Оз. Дяньшань	2016	10.1	10.6	16.4	Yang et al., 2019
Обыкновенный сазан	Оз. Тайху	2009	0.51	6.56	0.58	Wang et al., 2012; Yu et al., 2012
	Оз. Наньсыху	2011	2.46	3.58	–	Zhang et al., 2014
	Оз. Враньское	2014	0.23 ¹	1.37 ²	2.56 ³	Romanić et al., 2018
	Оз. Дяньшань	2016	8.20	12.7	15.3	Yang et al., 2019
Амурский сазан	Оз. Ханка	2018	2.15	1.07	0.79	Наши данные
Монгольский краснопер	Оз. Тайху	2009	0.59	4.90	1.17	Wang et al., 2012; Yu et al., 2012
	Оз. Ханка	2018	1.63	0.38	0.80	Наши данные
Верхогляд	Оз. Тайху	2009	0.55	9.50	1.59	Wang et al., 2012; Yu et al., 2012
	Оз. Дяньшань	2016	7.80	8.70	17.0	Yang et al., 2019
	Оз. Ханка	2018	1.63	0.38	0.80	Наши данные

Табл. 5. Гигиенические требования безопасности пресноводной рыбы по содержанию ХОП и ПХБ в России и Китае (допустимые концентрации), нг/г сырой массы.

Страна	Показатель	ПДК	Примечание	Нормативные документы
Россия	ГХЦГ	30	Все виды продукции из пресноводной рыбы, кроме печени, икры, молоки, рыбного жира, сушеной и другой продукции, готовой к употреблению	ТР ТС 021/2011; ТР ЕАЭС 040/2016
		200	Икра и молоки рыб и продукты из них	
		1000	Печень рыб и продукты из нее	
	ДДТ и его метаболиты	300	Все виды продукции из пресноводной рыбы, кроме печени, икры и молоки, рыбного жира, сушеной и другой продукции, готовой к употреблению	
		3000	Печень рыб и продукты из нее	
		200	Рыбный жир	
		400	Икра и молоки рыб	
	ПХБ	2000	Все виды рыбной продукции, кроме печени и рыбного жира	
		5000	Печень рыб и продукты из нее	
		3000	Рыбный жир	
Китай	ДДТ	500	Продукты из гидробионтов	GB 2763-2016
	ГХЦГ	100	Продукты из гидробионтов	
	ПХБ	500	Гидробионты и продукты из них	

Сравнение концентраций СОЗ с требованиями нормативной документации России и Китая

Гигиенические требования к содержанию ХОП и ПХБ в рыбе и нерыбных объектах промысла представлены в Табл. 5. В России нормируемыми СОЗ выступают *p,p'*-изомеры ДДТ, ДДД и ДДЕ, α -, β - и γ -изомеры ГХЦГ, индикаторные конгенеры ПХБ (28, 52, 101, 118, 138, 153, 180) и диоксины (ТР ТС 021/2011, 2011²; ТР ЕАЭС 040/2016, 2016³). В то же время в Китае также учитывается δ -ГХЦГ, *o,p'*-изомеры ДДТ и его метаболитов и те же конгенеры ПХБ, а также более 200 наименований пестицидов (в том числе все, входящие в группу СОЗ) (GB 2763-2016, 2016⁴; GB 2762-2017, 2017⁵).

При сравнении полученных концентраций с требованиями нормативных документов нами не обнаружено превышения ПДК, принятых в России и Китае, что говорит об условной безопасности употребления рыбы, выловленной в оз. Ханка. Для более подробного и точного анализа необходимо провести оценку риска для здоровья человека и выявить безопасные уровни потребления рыбы из этого водоема.

² ТР ТС 021/2011, 2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции».

³ ТР ЕАЭС 040/2016, 2016. Технический регламент Евразийского экономического союза «О безопасности рыбы и рыбной продукции».

⁴ GB 2763-2016, 2016. National food safety standard for Maximum Residue Limits for Pesticides in Foods.

⁵ GB 2762-2017, 2017. National Food Safety Standard for Maximum Levels of Contaminants in Foods.

Заключение

Несмотря на международный заповедный статус оз. Ханка, его бассейн подвержен антропогенному воздействию. Территория вокруг водоема активно используется для ведения сельского хозяйства. При этом отмечается избыточность применения пестицидов со стороны Китая и вероятное использование запрещенных соединений на территории России. В целом на основании качественного состава СОЗ в рыбах оз. Ханка в 2018 г. нами зафиксировано давнее загрязнение водоема. В исследованных образцах обнаружены значительные уровни ГХЦГ, концентрации которых превышают таковые в рыбах из водоемов южного Китая и Европы. При этом содержание ДДТ в рыбах оз. Ханка в среднем ниже, чем в сравниваемых районах. Полихлорированные бифенилы, отражающие техногенный фактор загрязнения, имели тенденцию к более низкому накоплению по сравнению с ХОП, указывающими на влияние сельскохозяйственной деятельности. В то же время ПХБ аккумулировались в более высоких количествах в рыбах, ведущих придонный образ жизни и заглатывающих при питании ил. Стоит также отметить, что одним из основных источников поступления СОЗ в организмы рыб является процесс биомагнификации. При сравнении полученных данных с требованиями нормативных документов России и Китая не выявлено случаев превышения допустимых концентраций. Необходимо снизить антропогенное влияние на воды озера и выявить источники поступления запрещенных веществ.

Список литературы

- Бугаев, В.Ф., 2007. Рыбы бассейна реки Камчатки (численность, промысел, проблемы). Камчатпресс, Петропавловск-Камчатский, Россия, 189 с.
- Бурик, В.Н., 2010. Амурский сазан (*Cyprinus carpio haemotopterus*) в бассейнах рек Тунгуска и Забеловка. *Региональные проблемы* 13 (2), 62–66.
- Егидарев, Е.Г., Мишина, Н.В., Базаров, К.Ю., 2019. Современное использование земель в бассейне озера Ханка. В: Бакланов, П.Я. и др. (ред.), *Геосистемы северо-восточной Азии: особенности их пространственно-временных структур, районирование территории и акватории*. ФГБУН ТИГ ДВО РАН, Владивосток, Россия, 197–203. <http://www.doi.org/10.13140/RG.2.2.31640.65281>
- Коженкова, С.И., 2017. Кадастровые сведения о государственном природном биосферном заповеднике «Ханкайский» за 2017–2020 гг. Государственный природный биосферный заповедник «Ханкайский». Интернет-ресурс. Web page: http://khanka-lake.ru/attachments/e/14/%D0%A4%D0%93%D0%91%D0%A3_%D0%A5%D0%B0%D0%BD%D0%BA%D0%B0%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%BA%D0%B0%D0%B4%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B5%20%D1%81%D0%B2%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%202017-2020.pdf (дата обращения: 06.05.2020).
- Лягуша, М.С., Черняев, А.П., 2020. Современные уровни хлорорганических пестицидов (ХОП) в абиотических компонентах экосистем северо-западной части Тихого океана. В: Цыганков, В.Ю. (ред.), *Стойкие органические загрязняющие вещества (СОЗ) в Дальневосточном регионе: моря, организмы, человек*. Издательство Дальневосточного федерального университета, Владивосток, Россия, 101–127. <http://www.doi.org/10.24866/7444-4891-2/101-127>
- Промысловые рыбы СССР. Описания рыб (текст к атласу цветных рисунков рыб), 1949. Берг, Л.С. и др. (ред.). Пищепромиздат, Москва, СССР, 793 с.
- Рыбы пресных вод СССР и сопредельных стран, 1949. Берг, Л.С. (ред.). Издательство АН СССР, Москва – Ленинград, СССР, 467 с.
- Цыбринская, Н.А., 2009. Водно-прибрежные растения восточного берега озера Ханка (Спасский район, Приморский край). *Вестник Красноярского государственного аграрного университета* 9, 122–125.

- Alexander, D.E., 1999. Bioaccumulation, bioconcentration, biomagnification. In: Alexander, D.E., Fairbridge Rhodes, W. (eds.), *Environmental Geology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 43–44. https://doi.org/10.1007/1-4020-4494-1_31
- Anderson, B., Bailey, T., Garber, K., Hetrick, J., Hoffman, M. et al., 2008. White paper on methods for assessing ecological risks of pesticides with persistent, bioaccumulative and toxic characteristics. Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substances, Office of Pesticide Programs Environmental Fate and Effects Division, US EPA, Washington, DC, USA, 221 p.
- Carassius gibelio*, Prussian carp : fisheries. FishBase, 2024. Интернет-ресурс. URL: <https://www.fishbase.de/summary/Carassius-gibelio.html> (дата обращения: 06.09.2021).
- De Giosa, M., Czerniejewski, P., Rybczyk, A., 2014. Seasonal changes in condition factor and weight-length relationship of invasive *Carassius gibelio* (Bloch, 1782) from Leszczynskie Lakeland, Poland. *Advances in Zoology* **2014**, 678763. <https://doi.org/10.1155/2014/678763>
- Donets, M.M., Tsygankov, V.Yu., Boyarova, M.D., Gumovskiy, A.N., Kulshova, V.I. et al., 2021a. Flounders as indicators of environmental contamination by persistent organic pollutants and health risk. *Marine Pollution Bulletin* **164**, 111977. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.111977>
- Donets, M.M., Tsygankov, V.Yu., Gumovskiy, A.N., Gumovskaya, Y.P., Boyarova, M.D. et al., 2021b. Organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in Pacific salmon from the Kamchatka Peninsula and Sakhalin Island, Northwest Pacific. *Marine Pollution Bulletin* **169**, 112498. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112498>
- Erdogan, Z., Koc, T.H., Gungor, S., Ulunehir, G., 2014. Age, growth and reproductive properties of an invasive species *Carassius gibelio* (Bloch, 1782) (Cyprinidae) in the Ikizcetepeler Dam Lake (Balikesir), Turkey. *Periodicum biologorum* **116** (3), 285–291.
- Grung, M., Lin, Y., Zhang, H., Steen, A.O., Huang, J. et al., 2015. Pesticide levels and environmental risk in aquatic environments in China – A review. *Environment International* **81**, 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.04.013>
- Hu, Y., Fan, L., Liu, Z., Yu, Q., Liang, S. et al., 2019. Rice production and climate change in Northeast China: evidence of adaptation through land use shifts. *Environmental Research Letters* **14** (2), 024014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafa55>
- Huang, H., Zhang, Y., Chen, W., Chen, W., Yuen, D.A. et al., 2018. Sources and transformation pathways for dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) and metabolites in soils from Northwest Fujian, China. *Environmental Pollution* **235**, 560–570. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.071>
- Li, Q., Lu, Y., Wang, P., Wang, T., Zhang, Y. et al., 2018. Distribution, source, and risk of organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in urban and rural soils around the Yellow and Bohai Seas, China. *Environmental Pollution* **239**, 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.055>
- Lu, Q., Qiu, L., Yu, L., Zhang, S., de Toledo, R.A. et al., 2019. Microbial transformation of chiral organohalides: Distribution, microorganisms and mechanisms. *Journal of Hazardous Materials* **368**, 849–861. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.01.103>
- Lukyanova, O.N., Tsygankov, V.Yu., Boyarova, M.D., 2018. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in the Bering flounder (*Hippoglossoides robustus*) from the Sea of Okhotsk. *Marine Pollution Bulletin* **137**, 152–156. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.10.017>

- Petrova, L.E., Sorokina, O.A., Fomkin, I.V., Mamedova, E.E., 2019. Transboundary protected areas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **350**, 012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/350/1/012042>
- Romanić, S.H., Vuković, G., Klinčić, D., Sarić, M.M., Župan, I. et al., 2018. Organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in Cyprinidae fish: Towards hints of their arrangements using advanced classification methods. *Environmental Research* **165**, 349–357. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.05.003>
- Saadati, N., Abdullah, M.P., Zakaria, Z., Rezayi, M., Hosseinizare, N., 2012. Distribution and fate of HCH isomers and DDT metabolites in a tropical environment—case study Cameron Highlands—Malaysia. *Chemistry Central Journal* **6** (1), 130. <https://doi.org/10.1186/1752-153X-6-130>
- Sun, S., Zhang, C., Hu, R., 2020. Determinants and overuse of pesticides in grain production: A comparison of rice, maize and wheat in China. *China Agricultural Economic Review* **12** (2), 367–379. <https://doi.org/10.1108/CAER-07-2018-0152>
- Tsygankov, V.Yu., Boyarova, M.D., 2015. Sample preparation method for the determination of organochlorine pesticides in aquatic organisms by gas chromatography. *Achievements in the Life Sciences* **9** (1), 65–68. <https://doi.org/10.1016/j.als.2015.05.010>
- Tsygankov, V.Yu., Lukyanova, O.N., Khristoforova, N.K., 2016. The Sea of Okhotsk and the Bering Sea as the region of natural aquaculture: Organochlorine pesticides in Pacific salmon. *Marine Pollution Bulletin* **113** (1–2), 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.08.060>
- UNEP, 2001. Diagnostic Analysis of the lake Xingkai/Khanka basin (People's Republic of China and Russian Federation). UNEP, Nairobi, Kenya, 136 p.
- Urbaniak, M., 2007. Polychlorinated biphenyls: Sources, distribution and transformation in the environment – A literature review. *Acta Toxicologica* **15** (2), 83–93.
- Wang, D.-Q., Yu, Y.-X., Zhang, X.-Y., Zhang, S.-H., Pang, Y.-P., et al., 2012. Polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in fish from Taihu Lake: Their levels, sources, and biomagnification. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **82**, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.05.010>
- Xiangcan, J., Pingyanh, Z., 2007. Lake Xingkai/Khanka – Experience and lessons learned brief (Lake Basin Management Initiative). International waters learning exchange & resource network, 2024. Интернет-ресурс. URL: <https://iwlearn.net/documents/5977> (дата обращения: 15.07.2021).
- Yang, J., Qadeer, A., Liu, M., Zhu, J.-M., Huang, Y.-P. et al., 2019. Occurrence, source, and partition of PAHs, PCBs, and OCPs in the multiphase system of an urban lake, Shanghai. *Applied Geochemistry* **106**, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.04.023>
- Yang, X., Lin, E., Ma, S., Ju, H., Guo, L. et al., 2007. Adaptation of agriculture to warming in Northeast China. *Climatic Change* **84** (1), 45–58. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9265-0>
- Yu, Y.-X., Zhang, S.-H., Huang, N.-B., Li, J.-L., Pang, Y.-P. et al., 2012. Polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls in freshwater fish from Taihu Lake, China: Their levels and the factors that influence biomagnification. *Environmental Toxicology and Chemistry* **31** (3), 542–549. <https://doi.org/10.1002/etc.1722>
- Zhang, G., Pan, Z., Bai, A., Li, J., Li, X., 2014. Distribution and bioaccumulation of organochlorine pesticides (OCPs) in food web of Nansi Lake, China. *Environmental Monitoring and Assessment* **186** (4), 2039–2051. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3516-5>

References

- Alexander, D.E., 1999. Bioaccumulation, bioconcentration, biomagnification. In: Alexander, D.E., Fairbridge Rhodes, W. (eds.), *Environmental Geology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 43–44. https://doi.org/10.1007/1-4020-4494-1_31
- Anderson, B., Bailey, T., Garber, K., Hetrick, J., Hoffman, M. et al., 2008. White paper on methods for assessing ecological risks of pesticides with persistent, bioaccumulative and toxic characteristics. Office of Prevention, Pesticides and Toxic Substances, Office of Pesticide Programs Environmental Fate and Effects Division, US EPA, Washington, DC, USA, 221 p.
- Bugaev, V.F., 2007. Ryby basseina reki Kamchatki (chislennost', promysel, problemy) [Fish of the Kamchatka River basin (number, fishing, problems)]. Kamchatpress, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 189 p. (In Russian).
- Burik, V.N., 2010. Amurskii sazan (*Cyprinus carpio haematopterus*) v basseinakh rek Tunguska i Zabelovka [Amur carp (*Cyprinus carpio haematopterus*) in the basins of the Tunguska and Zabelovka rivers]. *Regional'nye problemy [Regional problems]* **13** (2), 62–66. (In Russian).
- Carassius gibelio*, Prussian carp : fisheries. FishBase, 2024. Интернет-ресурс. URL: <https://www.fishbase.de/summary/Carassius-gibelio.html> (дата обращения: 06.09.2021).
- De Giosa, M., Czerniejewski, P., Rybczyk, A., 2014. Seasonal changes in condition factor and weight-length relationship of invasive *Carassius gibelio* (Bloch, 1782) from Leszczynskie Lakeland, Poland. *Advances in Zoology* **2014**, 678763. <https://doi.org/10.1155/2014/678763>
- Donets, M.M., Tsygankov, V.Yu., Boyarova, M.D., Gumovskiy, A.N., Kulshova, V.I. et al., 2021a. Flounders as indicators of environmental contamination by persistent organic pollutants and health risk. *Marine Pollution Bulletin* **164**, 111977. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.111977>
- Donets, M.M., Tsygankov, V.Yu., Gumovskiy, A.N., Gumovskaya, Y.P., Boyarova, M.D. et al., 2021b. Organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in Pacific salmon from the Kamchatka Peninsula and Sakhalin Island, Northwest Pacific. *Marine Pollution Bulletin* **169**, 112498. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112498>
- Egidarev, E.G., Mishina, N.V., Bazarov, K.Yu., 2019. Sovremennoe ispol'zovanie zemel' v basseine ozera Khanka [Current land use in the Khanka Lake basin]. In: Baklanov, P.Ya. et al. (eds.), *Geosistemy severo-vostochnoi Azii: osobennosti ikh prostranstvenno-vremennykh struktur, raionirovanie territorii i akvatorii [Geosystems of Northeast Asia: features of their spatio-temporal structures, zoning of the territory and water area]*. Pacific Geographical Institute of the Far-Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia, 197–203. (In Russian). <http://www.doi.org/10.13140/RG.2.2.31640.65281>
- Erdogan, Z., Koc, T.H., Gungor, S., Ulunehir, G., 2014. Age, growth and reproductive properties of an invasive species *Carassius gibelio* (Bloch, 1782) (Cyprinidae) in the Ikizcetepeler Dam Lake (Balikesir), Turkey. *Periodicum biologorum* **116** (3), 285–291.
- Grung, M., Lin, Y., Zhang, H., Steen, A.O., Huang, J. et al., 2015. Pesticide levels and environmental risk in aquatic environments in China – A review. *Environment International* **81**, 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.04.013>
- Hu, Y., Fan, L., Liu, Z., Yu, Q., Liang, S. et al., 2019. Rice production and climate change in Northeast China: evidence of adaptation through land use shifts. *Environmental Research Letters* **14** (2), 024014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafa55>
- Huang, H., Zhang, Y., Chen, W., Chen, W., Yuen, D.A. et al., 2018. Sources and transformation pathways for dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) and metabolites in soils from Northwest Fujian, China. *Environmental Pollution* **235**, 560–570. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.071>

- Kozhenkova, S.I., 2017. Kadastrovye svedeniya o gosudarstvennom prirodnom biosfernom zapovednike "Khankaiskii" za 2017–2020 gg. [Cadastral information on the Khankaisky State Natural Biosphere Reserve for 2017-2020]. Web page. URL: http://khanka-lake.ru/attachments/article/14/%D0%A4%D0%93%D0%91%D0%A3_%D0%A5%D0%B0%D0%BD%D0%BA%D0%B0%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%BA%D0%B0%D0%B4%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B5%20%D1%81%D0%B2%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%202017-2020.pdf (accessed: 06.05.2024). (In Russian).
- Li, Q., Lu, Y., Wang, P., Wang, T., Zhang, Y. et al., 2018. Distribution, source, and risk of organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in urban and rural soils around the Yellow and Bohai Seas, China. *Environmental Pollution* **239**, 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.03.055>
- Lu, Q., Qiu, L., Yu, L., Zhang, S., de Toledo, R.A. et al., 2019. Microbial transformation of chiral organohalides: Distribution, microorganisms and mechanisms. *Journal of Hazardous Materials* **368**, 849–861. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.01.103>
- Lukyanova, O.N., Tsygankov, V.Yu., Boyarova, M.D., 2018. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in the Bering flounder (*Hippoglossoides robustus*) from the Sea of Okhotsk. *Marine Pollution Bulletin* **137**, 152–156. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.10.017>
- Lyagusha, M.S., Chernyaev, A.P., 2020. Current levels of organochlorine pesticides (POPs) in the abiotic components of the Northwest Pacific ecosystems. In: Tsygankov, V.Yu. (ed.), *Stoikie organicheskie zagriazniyaiushchie veshchestva (SOZ) v Dal'nevostochnom regione: moria, organizmy, chelovek [Persistent organic pollutants (POPs) in the Far Eastern Region: Seas, organisms, human]*. Publishing House of the Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia, 101–127. (In Russian). <http://www.doi.org/10.24866/7444-4891-2/101-127>
- Petrova, L.E., Sorokina, O.A., Fomkin, I.V., Mamedova, E.E., 2019. Transboundary protected areas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **350**, 012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/350/1/012042>
- Promyslovye ryby SSSR. Opisaninya ryb (tekst k atlasu tsvetnykh risunkov ryb) [Commercial fish of the USSR. Descriptions of fish (text to the atlas of colored drawings of fish)], 1949. Berg, L.S. et al. (eds.) Pishchepromizdat, Moscow, USSR, 793 p. (In Russian).
- Romanić, S.H., Vuković, G., Klinčić, D., Sarić, M.M., Župan, I. et al., 2018. Organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in Cyprinidae fish: Towards hints of their arrangements using advanced classification methods. *Environmental Research* **165**, 349–357. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.05.003>
- Ryby presnykh vod SSSR i sopredel'nykh stran [Fishes of fresh waters of the UUSR and adjacent countries], 1949. Berg, L.S. (ed.). Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow – Leningrad, USSR, 467 p. (In Russian).
- Saadati, N., Abdullah, M.P., Zakaria, Z., Rezayi, M., Hosseinizare, N., 2012. Distribution and fate of HCH isomers and DDT metabolites in a tropical environment—case study Cameron Highlands—Malaysia. *Chemistry Central Journal* **6** (1), 130. <https://doi.org/10.1186/1752-153X-6-130>
- Sun, S., Zhang, C., Hu, R., 2020. Determinants and overuse of pesticides in grain production: A comparison of rice, maize and wheat in China. *China Agricultural Economic Review* **12** (2), 367–379. <https://doi.org/10.1108/CAER-07-2018-0152>
- Tsibrinskaya, N.A., 2009. Vodno-pribrezhnye rasteniya vostochnogo berega ozera Khanka (Spasskii raion, Primorskii krai) [Water-coastal plants of the eastern part of Lake Khanka]. *Vestnik Krasnoyarskogo*

- gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University] **9**, 122–125. (In Russian).
- Tsygankov, V.Yu., Boyarova, M.D., 2015. Sample preparation method for the determination of organochlorine pesticides in aquatic organisms by gas chromatography. *Achievements in the Life Sciences* **9** (1), 65–68. <https://doi.org/10.1016/j.als.2015.05.010>
- Tsygankov, V.Yu., Lukyanova, O.N., Khristoforova, N.K., 2016. The Sea of Okhotsk and the Bering Sea as the region of natural aquaculture: Organochlorine pesticides in Pacific salmon. *Marine Pollution Bulletin* **113** (1–2), 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.08.060>
- UNEP, 2001. Diagnostic Analysis of the lake Xingkai/Khanka basin (People's Republic of China and Russian Federation). UNEP, Nairobi, Kenya, 136 p.
- Urbaniak, M., 2007. Polychlorinated biphenyls: Sources, distribution and transformation in the environment – A literature review. *Acta Toxicologica* **15** (2), 83–93.
- Wang, D.-Q., Yu, Y.-X., Zhang, X.-Y., Zhang, S.-H., Pang, Y.-P., et al., 2012. Polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in fish from Taihu Lake: Their levels, sources, and biomagnification. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **82**, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.05.010>
- Xiangcan, J., Pingyanh, Z., 2007. Lake Xingkai/Khanka – Experience and lessons learned brief (Lake Basin Management Initiative). International waters learning exchange & resource network, 2024. Интернет-ресурс. URL: <https://iwlearn.net/documents/5977> (дата обращения: 15.07.2021).
- Yang, J., Qadeer, A., Liu, M., Zhu, J.-M., Huang, Y.-P. et al., 2019. Occurrence, source, and partition of PAHs, PCBs, and OCPs in the multiphase system of an urban lake, Shanghai. *Applied Geochemistry* **106**, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.04.023>
- Yang, X., Lin, E., Ma, S., Ju, H., Guo, L. et al., 2007. Adaptation of agriculture to warming in Northeast China. *Climatic Change* **84** (1), 45–58. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9265-0>
- Yu, Y.-X., Zhang, S.-H., Huang, N.-B., Li, J.-L., Pang, Y.-P. et al., 2012. Polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls in freshwater fish from Taihu Lake, China: Their levels and the factors that influence biomagnification. *Environmental Toxicology and Chemistry* **31** (3), 542–549. <https://doi.org/10.1002/etc.1722>
- Zhang, G., Pan, Z., Bai, A., Li, J., Li, X., 2014. Distribution and bioaccumulation of organochlorine pesticides (OCPs) in food web of Nansi Lake, China. *Environmental Monitoring and Assessment* **186** (4), 2039–2051. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3516-5>