ГЛАВА 6

СОВРЕМЕННЫЕ УРОВНИ СТОЙКИХ ОРГАНИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ (СОЗ) В РЫБАХ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЕЙ РОССИИ

**В.Ю. Цыганков^{1,2}, М.Д. Боярова¹, М.М. Донец¹,
Ю.П. Гумовская¹, А.Н. Гумовский¹, В.А. Лях¹, А.В. Литвиненко³,
О.Ю. Бусарова⁴, Н.К. Христофорова²**

¹ Школа биомедицины, Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ), 690922, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10. E-mail: tsig_90@mail.ru.

² Школа естественных наук, Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ), 690922, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10.

³ Институт естественных наук и техносферной безопасности, Сахалинский государственный университет (СахГУ), 693008, г. Южно-Сахалинск, ул. Пограничная, 68.

⁴ Институт рыболовства и аквакультуры, Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет (Дальрыбвтуз), 690087, г. Владивосток, ул. Луговая, д. 52 Б.

¹ School of Biomedicine, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, Russia, 690922. E-mail: tsig_90@mail.ru

² School of School of Natural Sciences, Far Eastern Federal University, 10 Ajax Bay, Russky Island Vladivostok, Russia, 690922.

³ Institute of Natural Sciences and Technosphere Safety, Sakhalin State University, 68 Pogranichnaya St., 693008, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

⁴ Fishery and Aquaculture Institute, Far Eastern State Technical Fisheries University, 52B. Lugovaya st., 690087, Vladivostok, Russia.

Для цитирования: Цыганков В.Ю., Боярова М.Д., Донец М.М., Гумовская Ю.П., Гумовский А.Н., Лях В.А., Литвиненко А.В., Бусарова О.Ю., Христофорова Н.К. Современные уровни стойких органических загрязняющих веществ (СОЗ) в рыбах дальневосточных морей России // Стойкие органические загрязняющие вещества (СОЗ) в Дальневосточном регионе: моря, организмы, человек : монография / В.Ю. Цыганков, М.М. Донец, Н.К. Христофорова [и др.] ; науч. ред. В.Ю. Цыганков. – Владивосток : Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2020. – С. 128–194. – <https://doi.org/10.24866/7444-4891-2/128-194>.

For citing: Tsygankov V.Yu., Boyarova M.D., Donets M.M., Gumovskaya Yu.P., Gumovskiy A.N., Lyakh V.A., Litvinenko A.V., Busarova O.Yu., Khristoforova N.K. Current levels of persistent organic pollutants (POPs) in fish of the Russian Far Eastern Seas // Persistent organic pollutants (POPs) in the Far Eastern Region: Seas, Organisms, Human : monograph / V.Yu. Tsygankov, M.M. Donets, N.K. Khristoforova [et al.] ; ed. by V.Yu. Tsygankov. – Vladivostok : Publishing House of the Far Eastern Federal University, 2020. – P. 128–194. – <https://doi.org/10.24866/7444-4891-2/128-194>.

В главе показаны исследования содержания изомеров ГХЦГ, ДДТ и его метаболитов, конгенов ПХБ в органах и тканях тихоокеанских лососей и камбал из дальневосточных морей России. Описаны внутривидовые, межвидовые и географические различия в накоплении опасных токсикантов.

Ключевые слова: ГХЦГ; ДДТ; ПХБ; тихоокеанские лососи; камбала; дальневосточные моря.

CHAPTER 6. Current levels of persistent organic pollutants (POPs) in fish of the Russian Far Eastern Seas

*V.Yu. Tsygankov^{1,2}, M.D. Boyarova¹, M.M. Donets¹,
Yu.P. Gumovskaya¹, A.N. Gumovskiy¹, V.A. Lyakh¹, A.V. Litvinenko³,
O.Yu. Busarova⁴, N.K. Khristoforova²*

In the chapter, research of the isomers of HCH, DDT and its metabolites, PCB congeners content in the organs and tissues of Pacific salmon and flounders from the Far Eastern Seas of Russia are presented. Intraspecific, interspecific and geographical differences in the accumulation of dangerous toxicants are described.

Keywords: HCHs; DDTs; PCBs; Pacific salmon; flounder; Far Eastern Seas.

Для снижения уровня холестерина и высокого давления крови, укрепления стенок сосудов медики многих стран рекомендуют регулярно еженедельно употреблять рыбу с высоким содержанием омега-3 полиненасыщенных жирных кислот. Такими кислотами богаты жирные рыбы – сельди, макрели и лососи. Употребление этих рыб и соответственно омега-3 жирных кислот (эйкозапентаеновая и докозагексаеновая кислоты) помогает не только снизить риск сердечнососудистых заболеваний и эндометриального рака, но и повысить уровень микроэлементов, крайне необходимых человеку, прежде всего калия и фосфора, усилить умственные и познавательные способности, а также оказывает еще ряд позитивных эффектов [29, 30, 35]. Несмотря на очевидную пользу и необходимость регулярного включения

этих жирных рыб в диету, их использование вызывает в некоторых случаях беспокойство, что связано с биоаккумуляцией в их тканях контаминантов окружающей среды, таких как стойкие органические загрязняющие вещества (СОЗ) [30, 32]. До 90% этих поллютантов поступают в организм человека с пищей. Конечным «депо» СОЗ в окружающей среде являются морские экосистемы, следовательно, данные вещества могут накапливаться в различных объектах морского промысла [34, 45, 46].

Дальневосточные моря (Японское, Охотское и Берингово моря) являются основными промысловыми зонами Российской Федерации. Среди вылавливаемых объектов тихоокеанские лососи – наиболее массовая и потому очень важная в промысловом отношении группа. Их уловы на 90% обеспечиваются тремя главными видами: горбушей, кетой и неркой. Горбуша – самый многочисленный, наиболее мелкий и быстрорастущий вид. В российских водах горбуша имеет ведущее промысловое значение. На втором месте по численности после горбуши стоит кета, более распространенная, по сравнению с другими представителями рода..

Вылавливаемые на Дальнем Востоке камбалы также относятся к наиболее значимым для промысла объектам, они составляют 9,5% от общего объема вылова рыбы на Дальнем Востоке [1]. Объем вылова, разнообразие видов и невысокая цена на рынке определяют их особую важность в структуре питания местного населения. Одним из наиболее востребованных видов камбал является палтусовидная камбала (*Hippoglossoides robustus*), широко распространенная в Охотском, Японском морях и Татарском проливе.

6.1. Тихоокеанские лососи (род *Oncorhynchus*)

В рамках нашего исследования для анализа на содержание СОЗ отобраны следующие виды: горбуша (*Oncorhynchus gorbuscha*), кета (*O. keta*), сима (*O. masou*), чавыча (*O. tshawytscha*) и нерка (*O. nerka*). Образцы рыб отбирались в течение 2010–2018 гг. в различных частях дальневосточных морей: в западной части Берингова моря (2010–2011 гг.); прикурильских водах Охотского моря (2012–2013 гг.); озере Азабачье (2017 г.); устье р. Бахура (Охотское море) (2017); устье р. Поронай (залив Терпения, Охотское море) (2017 г.); и р. Камчатка (Восточная часть п-ова Камчатка) (2018 г.). Исследо-

вались мышцы, печень, гонады самцов, икра. В рыбах 2010–2013 гг. вылова анализировались только ХОП. Из ДДТ и его метаболитов исследовались только *p,p'*-изомеры. В особях 2017–2018 гг. вылова, помимо ХОП, определялись конгенеры ПХБ (28, 52, 155, 101, 153, 118, 143, 138, 180 и 207 ПХБ).

6.1.1. Внутривидовые различия в аккумуляции СОЗ тихоокеанскими лососями Охотского и Берингова морей

Горбуша (*O. gorbuscha*). Образцы отбирались в южной части Охотского моря (прикурильские воды), оз. Азабачье (п-ов Камчатка) и устье р. Поронай (залив Терпения, Охотское море). СОЗ обнаружены во всех исследованных образцах (табл. 6.1, 6.2).

В горбуше из прикурильских вод Охотского моря ХОП обнаруживались во всех образцах, изменяясь в диапазоне от 60,9 до 715,2 (среднее – $295,2 \pm 203,6$) нг/г липидов. Их основную часть составляли изомеры ГХЦГ, суммарные концентрации которых варьировали от 60,9 до 666,6 (среднее – $277,0 \pm 188,4$) нг/г липидов. Среди изомеров ГХЦГ обнаружены α -, β - и γ -формы в диапазонах 60,9–446,8 нг/г, 4,4–171 нг/г и 5,2–65,6 нг/г липидов со средними значениями $199,8 \pm 130,1$, $50,5 \pm 48,6$, $33,3 \pm 20,9$ нг/г липидов, соответственно. Доминирующим изомером был α -ГХЦГ, что указывает на длительную циркуляцию исходного вещества в среде и процесс его деградации. Из метаболитов ДДТ во всех образцах обнаружен только ДДЕ в диапазоне от 0,8 до 49,6 (среднее – $21,9 \pm 18,2$) нг/г липидов, что говорит как об отсутствии «свежего» загрязнения экосистемы, так и о деструкции исходного ДДТ.

В мышцах рыб из прикурильского района обнаружены минимальные (среди органов) концентрации ХОП ($p \leq 0,05$), их диапазон варьировал в пределах 89,3–222,8, среднее – 141 ± 46 нг/г липидов (рис. 6.1). Суммарная концентрация ГХЦГ составила 132 ± 49 , ДДЕ – $9,0 \pm 6,0$ нг/г липидов. В печени уровни ХОП варьировали в пределах 60,9–500,5, среднее – 279 ± 166 нг/г липидов. Суммарная концентрация ГХЦГ достигала 259 ± 144 , ДДЕ – 30 ± 21 нг/г липидов. В икре и гонадах горбуши из Охотского моря диапазон концентраций ХОП изменялся от 131,5 до 399,4 и от 588,4 до 715,2 нг/г липидов со средними значениями 285 ± 138 и 645 ± 65 нг/г липидов, соответственно, являющимися максимальными показателями для всех исследованных органов. Концентрации изомеров ГХЦГ в икре и гонадах – 279 ± 139 и 600 ± 60 нг/г липидов, соответственно, ДДЕ – 10 ± 6 и 44 ± 5 нг/г липидов, соответственно.

Таблица 6.1

Средние концентрации ХОП в органах горбуши, нг/г липидов

α-ГХЦГ	β-ГХЦГ	γ-ГХЦГ	δ-ГХЦГ	о,р'-ДДТ	р,р'-ДДТ	о,р'-ДДД	р,р'-ДДД	о,р'-ДДЕ	р,р'-ДДЕ
Южная часть Охотского моря (прикурильский район)									
Мышцы	101,0±45,0	19,0±9,0	12,0±4,0	–	<ПО ²	–	<ПО	–	9,0±6,0
Печень	191,0±118,0	38,0±18,0	54,0±9,0	–	<ПО	–	<ПО	–	30,0±21,0
Икра	210,0±96,0	41,0±31,0	28,0±19,0	–	<ПО	–	<ПО	–	10,0±6,0
Гонады	405,0±38,0	143,0±26,0	52,0±3,0	–	<ПО	–	<ПО	–	44,0±5,0
Озеро Азабачье									
Мышцы	<ПО	18,4±11,6	<ПО	–	<ПО	7,2±2,6	3,2 ³	<ПО	110,1
Печень	<ПО	69,4±70,3	<ПО	–	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Гонады	<ПО	52,4±34,3	<ПО	–	<ПО	<ПО	61,5	3,3	<ПО
Устье р. Поронай, восточное побережье о. Сахалин									
Мышцы	25,7±25,3	5,1±3,0	1,1±1,2	1,8±2,2	2,4±0,9	4,0±2,5	1,1±0,6	3,1±3,4	0,6±0,5
Печень	32,2±29,9	8,1±9,4	4,3±4,4	6,1±4,5	<ПО	<ПО	2,0±0,4	5,0±2,4	0,7±0,2
Икра	31,1±45,6	11,1±9,4	1,1±1,4	3,2±2,5	<ПО	<ПО	1,3	2,5±2,0	0,2
Гонады	61,6±41,8	3,2	15,0±8,2	13,7±6,8	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	3,0±1,5

¹ не исследовалось; ² ниже пределов обнаружения; ³ обнаружено в одном образце

Таблица 6.2

Средние концентрации конгенов ПХБ в органах горбуши, нг/г липидов

	ПХБ 28	ПХБ 52	ПХБ 155	ПХБ 101	ПХБ 118	ПХБ 143	ПХБ 153	ПХБ 138
Оз. Азабачье								
Мышцы	2,9±1,8	2,6 ²	<ПО ¹	9,7±5,4	8,8±5,3	4,2	7,6±4,3	5,1±3,8
Печень	3,9	<ПО	<ПО	4,3±2,6	19,2±25,3	16,2	1,7	10,0±10,5
Гонады	43,2	24,3	<ПО	74,3±37,3	254,0±180,2	<ПО	174,6±117,4	118,7
Устье р. Поронай, восточное побережье о. Сахалин								
Мышцы	1,9±1,7	1,4±1,1	0,8±0,4	3,2±1,6	3,6±1,7	4,8±2,7	4,2±1,7	3,5±1,6
Печень	8,5±17,3	6,7±4,6	0,9	2,1±1,6	3,6±0,2	<ПО	3,6±2,0	3,5±0,4
Икра	0,9±0,5	5,1±3,7	1±0,2	3,1±0,9	4,4±1,1	9,0	5,1±2,5	3,9±1,4
Гонады	1,9	6,4±4,3	<ПО	2,2	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО

¹ ниже пределов обнаружения; ² обнаружено в одном образце

В горбуше из оз. *Азабачье* диапазон ХОП во всех органах варьировал в пределах 16,5–151,8 (среднее – $68,9 \pm 49,7$) нг/г липидов. Большую часть ХОП составлял ГХЦГ, представленный только наиболее устойчивой β -формой с содержанием от 9,8 до 119,1 и средним значением $43,9 \pm 39,7$ нг/г липидов. ДДТ и его метаболиты обнаруживались эпизодически, находясь в диапазоне от 6,7 до 120,2 (среднее – $49,9 \pm 54,1$) нг/г липидов. Наиболее часто встречался метаболит *p,p'*-ДДТ, концентрации которого варьировали в мышцах от 4,9 до 10,1 (среднее – $7,2 \pm 2,6$) нг/г липидов. *o,p'*-ДДД обнаружен в двух образцах с концентрациями 3,2 и 61,5 нг/г липидов.

В мышцах горбуши из оз. Азабачье диапазон концентраций ХОП варьировал от 16,5 до 151,8 (среднее – $63,4 \pm 76,6$) нг/г липидов. Средние значения ГХЦГ составили $18,4 \pm 11,6$ нг/г липидов, ДДТ – $45,0 \pm 65,1$ нг/г липидов (рис. 6.2). В печени ХОП были представлены только β -ГХЦГ – $69,4 \pm 70,3$ нг/г липидов. В гонадах содержание ХОП изменялось от 57,4 до 83,9 (среднее $74,0 \pm 14,4$ нг/г липидов), β -ГХЦГ – $52,4 \pm 34,3$ нг/г липидов. Из ДДТ и его метаболитов обнаружены *o,p'*-ДДД и *p,p'*-ДДД с концентрациями 61,5 и 3,3 нг/г липидов, соответственно.

Рис. 6.1. Средние суммарные концентрации ГХЦГ и ХОП (медианы) в органах горбуши из южной части Охотского моря (прикурильский район), нг/г липидов

Рис. 6.2. Средние суммарные концентрации ДДТ, ГХЦГ и ХОП в органах горбуши из оз. Азабачье, нг/г липидов

Суммарные концентрации ПХБ в органах горбуши из оз. Азабачье варьировали от 9,6 до 739,7 (среднее — $175,4 \pm 272,0$) нг/г липидов. Наиболее часто выявлялись ПХБ 101 и ПХБ 118, уровни которых составляли $23,8 \pm 34,5$ и $74,0 \pm 131,1$ нг/г липидов, соответственно. 52 и 143 ПХБ конгенеры обнаруживались эпизодически, с концентрациями: 2,6 и 24,3; 4,2 и 16,2 нг/г липидов, соответственно. 155, 180 и 207 ПХБ конгенеры не выявлялись, находясь на уровнях ниже пределов обнаружения во всех образцах.

В мышцах суммарные концентрации ПХБ варьировали от 17,3 до 50,3 (среднее — $32,9 \pm 16,6$) нг/г липидов, в печени — от 9,6 до 89,2 (среднее — $37,4 \pm 44,9$) нг/г липидов, в гонадах — от 452,3 до 739,7 (среднее — $596,0 \pm 203,2$) нг/г липидов. В основном, определялись «тяжелые» ПХБ (рис. 6.3).

В мышцах уровни ХОП варьировали от 2,5 до 83,9 со средним значением $27,8 \pm 28,1$ нг/г липидов. Суммарная концентрация ГХЦГ составила $23,1 \pm 27,6$ нг/г липидов, ДДТ и его метаболитов — $5,9 \pm 7,4$ нг/г липидов. В печени уровни ХОП (6,7–135,3 со средним значением $48,3 \pm 40,3$ нг/г липидов) достоверно ($p \leq 0,05$) выше, чем в мышцах. Суммарная концентрация ГХЦГ составила $45,2 \pm 39,7$ нг/г липидов, ДДТ и его метаболитов — $4,5 \pm 3,7$ нг/г липидов. В икре и гонадах горбуши ХОП находились на уровне 12–150,1 (среднее — $42,2 \pm 53,8$) и 42,7–117,4 (среднее — $85,8 \pm 36,9$) нг/г липидов. Суммарная концентрация ГХЦГ в икре — $39,3 \pm 53,3$ нг/г

липидов, в гонадах – $83,6 \pm 36,6$ нг/г липидов. Из ДДТ и его метаболитов, *o,p'*-ДДТ и *p,p'*-ДДТ были ниже пределов обнаружения во всех половых продуктах. *o,p'*-ДДД, *o,p'*-ДДЕ и *p,p'*-ДДЕ в икре обнаружены единично в концентрациях 1,3, 0,2 и 1 нг/г липидов, соответственно. *p,p'*-ДДД – $2,5 \pm 2,0$ нг/г липидов. В гонадах обнаружен только *o,p'*-ДДЕ – $3,0 \pm 1,5$ нг/г липидов.

Рис. 6.3. Средние концентрации наиболее определяемых конгенов ПХБ в органах горбуши из оз. Азабачье, нг/г липидов

Диапазоны суммарных концентраций ПХБ в горбуше из устья р. Поронай варьировали от 2,2 до 69,8 (среднее – $18,1 \pm 14,2$) нг/г липидов. Среди всех образцов наименее определяемым конгеном являлся ПХБ 143. ПХБ 180 и 207 не обнаружены ни в одной исследованной пробе.

В мышцах суммарные концентрации ПХБ варьировали от 9 до 33,5 со средним значением $19,1 \pm 8,0$ нг/г липидов (рис. 6.5). Во всех образцах обнаружены 28, 52, 155, 101, 118, 153, 138 конгенеры. В печени суммарные концентрации ПХБ находились в диапазоне от 2,5 до 69,8 со средним значением $17,9 \pm 21,2$ нг/г липидов. Наиболее определяемыми были 28, 52, 101, 118, 153 и 138 конгенеры. В половых продуктах суммарные концен-

трации ПХБ варьировали: в икре – от 13,3 до 41,5 (среднее – $24,8 \pm 10,5$); гонадах – от 2,2 до 11,3 (среднее – $5,8 \pm 4,0$) нг/г липидов, соответственно. Наиболее определяемыми ПХБ в икре являлись 28, 52, 155, 101, 118, 153 и 138 конгенеры. Во всех образцах гонад концентрации ПХБ 155, 118, 143, 153 и 138 были ниже пределов обнаружения.

Концентрации α - и γ -ГХЦГ достоверно ($p \leq 0,05$) выше в горбуше из прикурильских вод Охотского моря, чем из устья р. Поронай (рис. 6.6).

Рис. 6.4. Концентрации Σ ДДТ, Σ ГХЦГ и Σ ХОП (медианы) в органах горбуши из устья р. Поронай, нг/г липидов

Значимые различия в концентрациях могут быть связаны с тем, что рыбы, отобранные в Охотском море, во время нагула прошли через Тихоокеанское мусорное пятно – огромные количества пластика, плавающие на поверхности Тихого Океана. Известно, что частицы пластика способны адсорбировать на себе от пико- до нанограммов СОЗ [42]. Учитывая жизненную стратегию тихоокеанских лососей (преимущественное обитание в

зоне от 0 до 50 м, где и находится большая часть пластика), влияние Тихоокеанского мусорного пятна – наиболее вероятное объяснение повышения уровней СОЗ в органах горбуши из Охотского моря.

Рис. 6.5. Концентрации (медиана) ΣПХБ в органах горбуши из р. Поронай, нг/г липидов

Рис. 6.6. Концентрации (медианы) ГХЦГ в горбуше из различных районов дальневосточных морей, нг/г липидов

Уровни β -ГХЦГ достоверно больше в горбуше из оз. Азабачье, чем в рыбах из прикурильских вод Охотского моря и зал. Терпения. Озеро Азабачье находится внутри материка, основной водообмен осуществляется с р. Камчатка, впадающей в Камчатский залив. На п-ове Камчатка и, в частности, в долине реки Камчатка отсутствуют крупные сельскохозяйственные предприятия. Таким образом, можно предположить, что основными источниками поступления ХОП и ПХБ в экосистемы реки и озера могут выступать атмосферный перенос, биотранспорт мигрирующими видами и стоки со свалок твердых бытовых отходов. ГХЦГ в оз. Азабачье был представлен только β -изомером, указывающим на давнее загрязнение и деградацию исходного γ -ГХЦГ до наиболее стойкой формы.

Концентрации всех ДДТ в рыбе находились в следующем порядке: устье р. Поронай < юг Охотского моря < оз. Азабачье ($p \leq 0,05$) (рис. 6.7). Это может быть связано с более сложными метаболическими процессами при разрушении ДДТ, по сравнению с ГХЦГ. В оз. Азабачье обнаружен, в основном, ДДТ, что указывает на недавнее поступление этого токсиканта в экосистему водоема. В прикурильских водах Охотского моря обнаружен только ДДЕ, что свидетельствует о деструкции исходного соединения. В устье р. Поронай обнаружены почти все метаболиты ДДТ. Несмотря на небольшие концентрации, это может говорить о постоянном поступлении токсикантов в среду и продолжающейся деградации промежуточных соединений (ДДД).

Концентрации ПХБ в горбуше из оз. Азабачье достоверно выше ($p \leq 0,05$), чем в устье р. Поронай (рис. 6.8). Это может быть связано с ограниченным водообменом озера. В случае пестицидов он уменьшает возможное их поступление с водными массами реки. При этом локальных источников этих соединений рядом с водоемом нет. ПХБ, в свою очередь, широко использовались на всей территории СССР. При этом ПХБ-содержащие трансформаторы до сих пор применяются на территории России. Попадая в экосистему озера, ПХБ остаются в ней, за счет слабого испарения при низкой температуре, и аккумулируются в тканях рыб. Низкие концентрации ПХБ в горбуше из устья р. Поронай могут свидетельствовать о малых их концентрациях в открытых водах Мирового океана.

Анализ изменения концентраций ХОП в горбуше дальневосточных морей России показывает, что суммарные концентрации ГХЦГ и ДДТ в 2017 г. значительно меньше ($p \leq 0,05$) таковых в 2012 г. При этом снижения

уровней ГХЦГ и ДДТ не одинаковы: уменьшение концентраций у первого происходит активнее, чем у последнего.

Рис. 6.7. Суммарные концентрации (медианы) ДДТ в горбуше из районов исследования, нг/г липидов

Рис. 6.8. Суммарные концентрации (медианы) ПХБ в горбуше из оз. Азабачье и устья р. Поронай, нг/г липидов

Оценить изменения концентрации полихлорированных бифенилов во времени не представляется возможным, так как рыбы, в которых проводилось измерение ПХБ были собраны в одно время. Что касается ХОП, то для них на сегодняшний день явно видна тенденция к снижению уровней в горбуше дальневосточных морей России за последние 5 лет.

Чтобы определить возможные источники поступления ХОП и ПХБ в организм рыб, проведена корреляция между обнаруженными соединениями. Взаимосвязь изомеров ГХЦГ между собой объясняется единым источником поступления в экосистему. Корреляция между ДДЕ и изомерами ГХЦГ также говорит о едином источнике загрязнения. Вероятнее всего, основным путем поступления пестицидов в воды Охотского моря являются атмосферный перенос и морские течения.

Среди пестицидов в рыбе озера Азабачье (табл. 6.3) обнаружена значимая ($p \leq 0,01$) корреляция между β -ГХЦГ и o,p' -ДДЕ. Взаимосвязь между двумя соединениями может говорить о сходных путях деградации, одновременном появлении в органах и/или о едином источнике поступления. Первое наиболее вероятно, так как среди всех метаболитов ДДТ только o,p' -ДДЕ показал сильную ($p \leq 0,01$) корреляцию с β -ГХЦГ. Между o,p' -ДДД и p,p' -ДДТ очень сильная положительная прямая связь ($p \leq 0,01$), что, вероятнее всего, говорит о едином источнике поступления (атмосферный перенос) в экосистему. o,p' -ДДЕ показал очень сильную отрицательную корреляцию с p,p' -ДДТ, что, очевидно, свидетельствует о деградации p,p' -ДДТ до o,p' -ДДЕ в организмах рыб.

Среди ПХБ обнаружены очень сильные корреляции между всеми конгенерами на уровнях $p \leq 0,01$ и $p \leq 0,05$, что говорит о едином источнике поступления этих соединений в организм горбуши. Корреляции между ПХБ и ХОП варьировали от средних до очень сильных на уровнях $p \leq 0,01$ и $p \leq 0,05$. Известно, что эти соединения используются в разных отраслях промышленности и попадают в экосистемы из разных источников. Наиболее вероятным объяснением полученных результатов является присутствие на территории п-ова Камчатка могильников твердых бытовых отходов, в которых могут находиться ХОП и ПХБ одновременно. Стоки с таких свалок могут быть основной причиной совместного поступления пестицидов и промышленных отходов в экосистемы и организм рыб.

В горбуше из устья р. Поронай обнаружены сходные корреляции между соединениями, как и в других районах (табл. 6.4). Изомеры ГХЦГ коррелировали друг с другом (положительно) на уровне $p \leq 0,01$, причем δ -форма коррелировала со всеми изомерами. Среди метаболитов ДДТ положительная корреляция ($p \leq 0,01$) обнаружена между o,p' -и p,p' -изомерами, что, как и в других районах, свидетельствует о сходном источнике поступления СОЗ в среду.

Таблица 6.3

Корреляции между органическими соединениями в горбуше из оз. Азабачье

	β -ГХЦГ	$p.p'$ -ДДТ	$\alpha.p'$ -ДДД	$\alpha.p'$ -ДДЕ	ПХБ 28	ПХБ 52	ПХБ 101	ПХБ 118	ПХБ 143	ПХБ 153	ПХБ 138
β -ГХЦГ	1,000	0,483		1,000**	0,829	0,637	0,690*	0,749*	0,937	0,804*	-0,173
$p.p'$ -ДДТ		1,000		-1,000**	0,475	1,000**	0,536	0,515	0,654	0,923	-0,180
$\alpha.p'$ -ДДД			1,000	0	0,993	1,000**	0,989	0,998*	0	0,999*	1,000**
$\alpha.p'$ -ДДЕ				1,000	0	0	1,000**	1,000**	1,000**	0	1,000**
ПХБ 28					1,000	0,993	0,996**	0,997**	0	0,999**	0,997**
ПХБ 52						1,000	0,989	0,998*	0	0,999*	1,000**
ПХБ 101							1,000	0,984**	0,417	0,986**	0,364
ПХБ 118								1,000	0,591	0,995**	0,242
ПХБ 143									1,000	1,000**	-0,599
ПХБ 153										1,000	0,246
ПХБ 138											1,000

** Корреляция значима на уровне 0,01 (двухсторонняя) (темно-серые ячейки). * Корреляция значима на уровне 0,05 (двухсторонняя) (светло-серые ячейки).

Таблица 6.4

Корреляции между органическими соединениями, обнаруженными в горбуше из устья р. Поронай

	ГХЦГ	α -	β -	γ -	δ -	ДДТ	ДДД	ДДЕ	$p.p'$ -	ПХБ	52	155	101	118	143	153	138
α -ГХЦГ	1,000	0,556**	0,645**	0,667**	-0,301	0,012	0,062	0,052	0,018	0,518**	0,18	-0,121	0,211	-0,01	-0,641*	0,126	-0,011
β -ГХЦГ		1,000	0,441*	0,538**	-0,318	-0,258	-0,096	0,14	-0,155	0,502**	0,490**	0,078	0,445*	0,448*	-0,616*	0,454*	0,379
γ -ГХЦГ			1,000	0,708**	-0,36	-0,195	0,379	0,498**	0,09	0,288	0,379*	-0,114	0,098	0,178	-0,349	0,214	0,005
δ -ГХЦГ				1,000	-0,393	-0,255	0,298	0,343	-0,173	0,391*	0,525**	-0,025	0,218	0,343	-0,515	0,357	0,166
$\alpha.p'$ -ДДТ					1,000	0,843**	0,473	0,469	0,424	0,226	-0,117	-0,088	-0,235	-0,477	-0,39	-0,243	-0,201
$p.p'$ -ДДТ						1,000	0,294	0,057	0,693**	0,271	-0,18	-0,348	-0,283	-0,505	-0,504	-0,261	-0,195
$\alpha.p'$ -ДДД							1,000	0,662**	0,128	0,344	0,147	-0,301	-0,447	-0,481	0,062	-0,298	-0,552*
$p.p'$ -ДДД								1,000	-0,08	0,267	0,377*	0,132	0,302	0,344	-0,441	0,363	0,241
$\alpha.p'$ -ДДЕ									-0,022	0,374	-0,133	-0,103	-0,025	-0,039	-0,27	0,262	-0,183
$p.p'$ -ДДЕ									1,000	-0,249	-0,214	-0,127	-0,254	-0,45	-0,446	-0,394	-0,372
ПХБ 28										1,000	0,486**	0,084	0,493**	0,384	-0,175	0,587**	0,447*
ПХБ 52											1,000	0,213	0,580**	0,682**	-0,239	0,676**	0,567**
ПХБ 155												1,000	0,477*	0,557**	-0,028	0,484*	0,432
ПХБ 101													1,000	0,896**	-0,349	0,889**	0,782**
ПХБ 118														1,000	-0,239	0,937**	0,877**
ПХБ 143															1,000	-0,165	-0,166
ПХБ 153																1,000	0,904**
ПХБ 138																	1,000

* Корреляция значима на уровне 0,01 (двухсторонняя) (темно-серые ячейки). * Корреляция значима на уровне 0,05 (двухсторонняя) (светло-серые ячейки).

Среди конгенеров ПХБ также видна достоверная корреляция, причем с увеличением уровня хлорирования увеличивается количество конгенеров, с которыми коррелирует соединение. Наиболее важными являются данные об отрицательных корреляциях ($p \leq 0,05$) между ПХБ 143 с α - и β -ГХЦГ; ПХБ 138 и ПХБ 101 с o,p' -ДДД. Первая может свидетельствовать о возможном распаде ПХБ 143 до ГХЦГ с последующим переходом одного изомера в другой, либо о различных источниках поступления токсикантов. Вторая – о возможной деградации o,p' -ДДД до высокохлорированных ПХБ 138 и 101 в процессе метаболических преобразований.

Таким образом, источники поступления токсикантов в организм горбуши сходны для всех исследованных районов и отражают глобальное распространение СОЗ и локальное загрязнение от могильников твердых бытовых отходов.

Кета (*Oncorhynchus keta*). Образцы кеты отбирались на юге Охотского моря (прикурильские воды) в 2013 г и в р. Камчатка (п-ов Камчатка) в 2018 г. Анализу подвергались мышцы, печень, икра и гонады. Во всех исследованных образцах обнаружены СОЗ (табл. 6.5, 6.6).

В кете из *прикурильских вод Охотского моря* ХОП обнаружены во всех исследованных образцах в диапазоне от 56 до 4223 со средним значением $841,7 \pm 1209,9$ нг/г липидов. Основную часть ХОП составляли изомеры ГХЦГ, суммарная концентрация которых варьировала от 39,1 до 3850,3 со средним значением $775,6 \pm 1110,2$ нг/г липидов. ГХЦГ был представлен α -, β - и γ -изомерами. ДДТ был представлен только p,p' -ДДЕ в диапазоне 6,5-372,7 со средним значением $85,0 \pm 135,6$ нг/г липидов.

В мышцах кеты из прикурильских вод Охотского моря уровни ХОП варьировали от 78,8 до 174,1 (среднее – $125,4 \pm 34,7$) нг/г липидов и были наименьшими ($p \leq 0,05$), среди всех исследованных органов (рис. 6.9).

Суммарная концентрация ГХЦГ составила $111,4 \pm 40,9$ нг/г липидов. ДДТ и его метаболиты были представлены только p,p' -ДДЕ с концентрацией $14,1 \pm 6,6$ нг/г липидов. В печени уровни ХОП составили 56-294,1 со средним значением $183,5 \pm 84,2$ нг/г липидов. Суммарные концентрации ГХЦГ и ДДЕ составили $166,0 \pm 80,0$ и $21,0 \pm 9,0$ нг/г липидов, соответственно. В икре кеты из Охотского моря уровни ХОП варьировали в пределах 793,7-1825,4 со средним значением $1472,0 \pm 587,0$ нг/г липидов и были представлены только изомерами ГХЦГ. В гонадах ХОП находились в диапазоне от 1485,3 до 4223,0 (среднее – $2961,0 \pm 1381,0$) нг/г липидов, что является максимальным показателем среди

всех исследованных органов. Суммарные концентрации ГХЦГ и ДДЕ в гонадах составили $2628,0 \pm 1342$ и $333,0 \pm 40,0$ нг/г липидов, соответственно.

В кете из *р. Камчатка* диапазон ХОП во всех органах варьировал в пределах 1-20,7 со средним значением $6,2 \pm 6,1$ нг/г липидов. Большую часть ХОП составлял ГХЦГ – от 1,0 до 14,7 (среднее – $3,9 \pm 4,3$) нг/г липидов. ДДТ и его метаболиты обнаруживались фрагментарно в диапазоне от 0,3 до 9,2 (среднее – $3,0 \pm 3,4$) нг/г липидов. Наиболее определяемым метаболитом был *o,p'*-ДДЕ – от 0,3 до 2,5 со средним значением $1,2 \pm 0,8$ нг/г липидов. *o,p'*-ДДТ, *o,p'*-ДДД обнаружены в одном образце печени в концентрациях 1,3 и 1,6 нг/г липидов, соответственно.

Рис. 6.9. Суммарные концентрации ХОП и ГХЦГ в органах кеты из южной части Охотского моря, нг/г липидов

В мышцах кеты из *р. Камчатка* уровень ХОП варьировал от 2,5 до 10,3 со средним значением $5,9 \pm 4,0$ нг/г липидов (рис. 6.10). Средняя концентрация ГХЦГ составила $2,1 \pm 1,7$ нг/г липидов. α - и β -изомеры обнаружены в одной пробе – 0,3 и 3,3 нг/г липидов, соответственно. Средние уровни ДДТ и его метаболитов в мышцах составили $3,8 \pm 4,7$ нг/г липидов и были представлены только *o,p'*-ДДЕ ($1,4 \pm 0,6$ нг/г липидов) и *p,p'*-ДДЕ (7,2 нг/г липидов). В печени концентрации ХОП варьировали от 1,3 до 20,7 нг/г липидов (среднее – $9,4 \pm 10,1$) нг/г липидов. Средний уровень ГХЦГ и ДДТ составил $6,4 \pm 7,3$ и $3,0 \pm 2,9$ нг/г липидов, соответственно. Из метаболитов ДДТ обнаружены *o,p'*-ДДТ (1,3 нг/г липидов), *o,p'*-ДДД (1,6 нг/г липидов и), *o,p'*-ДДЕ ($1,3 \pm 1,1$ нг/г липидов) и *p,p'*-ДДЕ (0,6 и 1,5 нг/г липидов). В гонадах диапазон концентраций ХОП был представлен только ГХЦГ – от 1,0 до 4,7 со средним значением $2,9 \pm 2,6$ нг/г липидов.

Таблица 6.5

Средние концентрации ХОП в органах кеты из , нг/г липидов

α -ГХЦГ	β -ГХЦГ	γ -ГХЦГ	α,p' -ДДТ	p,p' -ДДТ	o,p' -ДДТ	p,p' -ДДД	o,p' -ДДЕ	p,p' -ДДЕ
Южная часть Охотского моря								
Мышцы	63,0±22,0	42,0±27,0	19,5±0,1	<ПО	–	<ПО	–	14,0±7,0
Печень	92,0±52,0	44,0±26,0	45,0±29,0	<ПО	–	<ПО	–	21,0±9,0
Икра	836,0±309,0	338,0±44,0	615,0±193,0	<ПО	–	<ПО	–	<ПО
Гонады	1098,0±186,0	1591,0±757,0	469,0±140,0	<ПО	–	<ПО	–	333,0±40,0
Река Камчатка								
Мышцы	0,3 ³	3,3	0,9±0,2	<ПО	<ПО	<ПО	1,4±0,6	7,2
Печень	0,9±0,7	6,3±6,3	1,2±0,9	1,3	<ПО	<ПО	1,3±1,1	1,1±0,6
Икра	0,1	3,6	0,5	<ПО	<ПО	<ПО	0,3	<ПО
Гонады	0,4±0,1	3,1	0,9±0,5	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО

¹ не исследовалось
² ниже пределов обнаружения
³ обнаружено в одном образце

Таблица 6.6

Средние концентрации конгенов ПХБ в органах кета из р. Камчатка, нг/г липидов

	ПХБ 28	ПХБ 52	ПХБ 155	ПХБ 101	ПХБ 118	ПХБ 143	ПХБ 153	ПХБ 138
Мышцы	2,7±1,0	5,4±1,5	<ПО ¹	7,3±1,6	10,7±0,4	4,1±0,8	5,7±0,6	5,9±1,1
Печень	1,3±0,3	13,1±7,3	<ПО	2,8±0,9	3,8±1,2	3,3	2,3±0,7	2,8±2,2
Икра	1,3 ²	50,6	0,4	4,7	4,7	<ПО	2,6	3,5
Гонады	2,9±3,0	17,7±21,2	2,0	2,4±0,6	2,7±0,8	<ПО	2,2±0,2	<ПО

¹ ниже пределов обнаружения
² обнаружено в одном образце

Суммарные концентрации ПХБ в органах кеты из р. Камчатка варьировали от 9,5 до 67,6 со средним значением $36,5 \pm 17,1$ нг/г липидов. 28, 52, 101, 118 и 153 конгенеры ПХБ обнаружены во всех исследованных образцах с суммарными концентрациями $2,1 \pm 1,4$, $15,7 \pm 16,3$, $4,4 \pm 2,5$, $6,0 \pm 3,7$ и $3,4 \pm 1,8$ нг/г липидов. Наименее определяемым конгеном был ПХБ 155, обнаруженный в двух образцах с концентрациями 0,37 и 2 нг/г липидов. 180 и 207 конгенеры ПХБ были ниже пределов обнаружения во всех исследованных образцах.

Рис. 6.10. Средние суммарные концентрации ДДТ, ГХЦГ и ХОП в органах кеты из р. Камчатка, нг/г липидов

В мышцах суммарные концентрации ПХБ находились в пределах 34,5–44,9 (среднее – $40,5 \pm 5,4$) нг/г липидов. Из всех исследованных конгенов, не обнаружены только 155, 180 и 207 конгенеры ПХБ (рис. 6.11). В печени концентрации ПХБ варьировали от 18,2 до 35,6 со средним значением $27,2 \pm 8,7$ нг/г липидов. ПХБ 143 обнаружен в одном образце с концентрацией 3,3 нг/г липидов. В гонадах суммарный диапазон ПХБ варьировал от 9,5 до 48,1 (среднее – $28,8 \pm 27,3$) нг/г липидов. ПХБ 155 обнаружен в одном образце с концентрацией 2,0 нг/г липидов. ПХБ 138 был ниже пределов обнаружения.

Сравнение результатов показало, что концентрации α -, β -, γ -изомеров ГХЦГ и ДДЕ достоверно ($p \leq 0,05$) выше в органах кеты из прикурильских вод Охотского моря, чем из р. Камчатка (рис. 6.12). Сравнить уровни накопления полихлорированных бифенилов в рыбах разных годов вылова невозможно, так как в кете из южной части Охотского моря определение уровней ПХБ не проводилось.

В целом, основным источником поступления ХОП в рыб из прикурильских вод Охотского моря можно считать перенос водными и воздушными массами.

Рис. 6.11. Концентрации наиболее определяемых конгенов ПХБ в органах кеты из р. Камчатка, нг/г липидов

Рис. 6.12. Суммарные концентрации ДДТ, ГХЦГ и ХОП в кете 2013 (Охотское море) и 2018 (р. Камчатка) гг. вылова, нг/г липидов

Обнаруженные концентрации ХОП в кете из р. Камчатка может отражать как атмосферный перенос СОЗ, так и влияние стоков со свалок твердых бытовых отходов. Это подтверждается последним отчетом администрации Камчатского края, где указано, что помимо существующих санкционированных свалок, гражданами ежегодно создаются и несанкционированные, зачастую содержащие опасные вещества. При этом стоит отметить, что район р. Камчатка не подвергается воздействию Козельского полигона (могильник пестицидов, включая ХОП), так как он находится в нижней части п-ова Камчатка. ПХБ, в свою очередь, могут поступать в реку со стоками свалок или из ПХБ-содержащих масел и пришедших в негодность трансформаторов [17].

Если рассмотреть временные тенденции в изменении концентраций СОЗ в органах кеты, то явно видна тенденция к снижению количества ХОП от 2013 года к 2018. В кете наблюдается снижение уровней как ГХЦГ, так и ДДТ, причем, в отличие от горбуши, концентрации ДДТ снижаются более интенсивно, чем ГХЦГ, что может быть связано с различиями в биологии этих рыб (разница в продолжительности жизни и местах нагула).

Согласно таблице корреляций между соединениями в органах кеты из прикурильских вод Охотского моря (табл. 6.7), очень сильные положительные корреляции обнаружены между всеми индивидуальными соединениями на уровне $p \leq 0,01$, что свидетельствует о едином источнике поступления в экосистему и организм рыб.

При анализе таблицы корреляций между индивидуальными соединениями в рыбах из р. Камчатка (табл. 6.8), среди пестицидов видна сильная положительная корреляция между α -и γ -ГХЦГ ($p \leq 0,05$), γ -ГХЦГ и o,p' -ДДЕ ($p \leq 0,05$) и очень сильная отрицательная корреляция между β -ГХЦГ и p,p' -ДДЕ ($p \leq 0,01$). Первые 2 взаимосвязи отражают единый источник поступления, последняя – вероятнее всего указывает на раздельное поступление соединений.

ПХБ 28, 52, 101, 118, 153 и 138 не показали достоверных корреляций с ГХЦГ и ДДТ. ПХБ 155 показал очень сильную положительную корреляцию ($p \leq 0,01$) с α - и γ -ГХЦГ и очень сильную отрицательную ($p \leq 0,01$) – с β -изомером. Первые две могут свидетельствовать о едином источнике поступления соединений в то время, как последняя может указывать на возможное разрушение дифенильной основы ПХБ с последующим образованием β -ГХЦГ. ПХБ 143 показал очень сильную отрицательную корреляцию ($p \leq 0,01$) с α -ГХЦГ, что может указывать на схожие процессы.

ПХБ 28 показал очень сильную положительную корреляцию ($p \leq 0,01$) с ПХБ 155, что, скорее всего свидетельствует о едином источнике поступления. В свою очередь ПХБ 52 показал очень сильную отрицательную корреляцию ($p \leq 0,01$) с ПХБ 155, что скорее всего указывает на то, что деградация последнего происходит с промежуточным образованием 52 конгенера. С 155 ПХБ очень сильные отрицательные корреляции ($p \leq 0,01$) показали более высокохлорированные ПХБ 101, 118 и 153, что указывает на деградацию и уменьшение хлора в кольце 155 ПХБ. При этом 101, 118, 153, 138, 118 и 153 ПХБ показали очень сильную положительную связь ($p \leq 0,01-0,05$) между собой, что также говорит о совместном поступлении в экосистему.

Таким образом, поступление ХОП и ПХБ в организм кеты из р. Камчатка имеет различные источники, связанные с атмосферным переносом (в случае ХОП) и местным загрязнением (стоки со свалок и поврежденных трансформаторов, в случае ПХБ).

Сима (*Oncorhynchus masu*). Образцы симы отбирались в 2017 году в устье р. Бахура (Долинский округ) на восточном побережье о. Сахалин.

СОЗ обнаружены во всех исследованных образцах (табл. 6.9, 6.10). Диапазон ХОП во всех исследованных образцах варьировал от 4,1 до 479,7 со средним значением $107,9 \pm 147,1$ нг/г липидов. Большую часть ХОП составляли изомеры ГХЦГ с диапазоном концентраций 2,8–479,7 (среднее – $104,3 \pm 149,3$) нг/г липидов. α -изомер был доминирующей формой ГХЦГ. ДДТ и его метаболиты обнаруживались фрагментарно, главным образом в мышцах. Суммарные концентрации ДДТ варьировали от 1,2 до 23,5 со средним значением $7,3 \pm 7,3$ нг/г липидов. Наиболее определяемым был p,p' -ДДД со средней концентрацией $4,4 \pm 4,2$ нг/г липидов.

В мышцах симы уровни ХОП варьировали от 4,1 до 35,4 (среднее значение – $20,1 \pm 11,0$) нг/г липидов (рис. 6.13). Суммарная концентрация ГХЦГ составила $11,8 \pm 11,5$ нг/г липидов. Среди ДДТ и его метаболитов обнаружены все исследованные соединения. Сумма ДДТ составила $8,3 \pm 8,6$ нг/г липидов. Наиболее определяемым метаболитом был p,p' -ДДД, с концентрацией $4,9 \pm 4,7$ нг/г липидов. В печени уровни ХОП варьировали от 32,2 до 141,7 со средним значением $76,1 \pm 45,2$ нг/г липидов. ГХЦГ составил $74,7 \pm 46,4$ нг/г липидов. В гонадах диапазон концентраций ХОП варьировал в пределах 22,2–479,7 ($305,5 \pm 179,1$) нг/г липидов, в икре – 16,5–17 ($16,8 \pm 0,4$) нг/г липидов. ХОП в гонадах были представлены только ГХЦГ ($305,5 \pm 179,1$), в икре – ГХЦГ и ДДЕ ($13,6 \pm 1,8$ и $3,2 \pm 1,4$ нг/г липидов, соответственно).

Таблица 6.7

Корреляции между органическими соединениями в органах кеты из Охотского моря

	α-ГХЦГ	β-ГХЦГ	γ-ГХЦГ	p,p'-ДДЕ
α-ГХЦГ	1,000	0,844**	0,955**	0,972**
β-ГХЦГ		1,000	0,819**	0,944**
γ-ГХЦГ			1,000	0,947**
p,p'-ДДЕ				1,000

** Корреляция значима на уровне 0,01 (двухсторонняя) (темно-серые ячейки).

Таблица 6.8

Корреляции между органическими соединениями, обнаруженными в кете из р. Камчатка

	ГХЦГ			ДДЕ		ПХБ							
	α-	β-	γ-	o,p'-	p,p'-	28	52	155	101	118	143	153	138
α-ГХЦГ	1,000	0,935	0,760	0,614	-0,662	-0,128	-0,292	1,000	-0,155	-0,036	-1,000	-0,054	0,183
β-ГХЦГ		1,000	0,798	0,845	-1,000	-0,207	-0,178	-1,000	0,087	0,062	0	0,091	0,568
γ-ГХЦГ			1,000	0,815	-0,802	0,305	0,080	1,000	0,056	0,031	0,262	0,013	0,238
o,p'-ДДЕ				1,000	0,092	0,340	-0,350	0	0,292	0,328	0,863	0,406	0,616
o,p'-ДДЕ					1,000	0,934	-0,976	0	0,908	0,910	0	0,918	0,650
ПХБ 28						1,000	0,173	1,000	0,398	0,321	0,041	0,287	0,517
ПХБ 52							1,000	-1,000	-0,158	-0,344	-0,365	-0,394	-0,277
ПХБ 155								1,000	-1,000	-1,000	0	-1,000	0
ПХБ 101									1,000	0,935	0,350	0,870	0,733
ПХБ 118										1,000	0,558	0,973	0,836
ПХБ 143											1,000	0,798	0,877
ПХБ 153												1,000	0,896
ПХБ 138													1,000

** Корреляция значима на уровне 0,01 (двухсторонняя) (темно-серые ячейки).

* Корреляция значима на уровне 0,05 (двухсторонняя) (светло-серые ячейки).

Рис. 6.13. Средние суммарные концентрации ДДТ, ГХЦГ и ХОП в органах симы, нг/г липидов

Суммарные концентрации ПХБ в органах симы варьировали от 3,3 до 115,8 нг/г липидов (среднее – $25,3 \pm 27,0$) нг/г липидов. Наиболее определяемыми среди всех образцов были ПХБ 52 и ПХБ 101, с концентрациями $10,3 \pm 12,3$ и $5,8 \pm 7,8$ нг/г липидов, соответственно. ПХБ 143, 180 и 207 были ниже пределов обнаружения.

Суммарные концентрации ПХБ в мышцах находились в диапазоне от 9,7 до 45,3 нг/г липидов (среднее – $23,6 \pm 11,7$), в печени – от 3,3 до 115,8 (среднее – $24,7 \pm 48,8$) и в икре – от 29,7 до 31,6 (среднее – $30,7 \pm 1,3$) нг/г липидов. Большая часть конгенов ПХБ обнаружена в мышцах (рис. 6.14). В печени наиболее определяемыми были ПХБ 52 ($19,4 \pm 19,0$ нг/г липидов) и ПХБ 101 ($9,5 \pm 12,8$ нг/г липидов). В гонадах из конгенов ПХБ найден только ПХБ 52 (29,9 нг/г липидов). В икре не обнаружен только 143 ПХБ.

При сравнении уровней СОЗ в различных органах, обнаружено, что в гонадах концентрации всех изомеров ГХЦГ достоверно ($p \leq 0,05$) выше, чем в печени, икре и мышцах. ДДТ и его метаболиты обнаружены, в основном, в мышцах. ПХБ также обнаружены в основном в мышцах.

Таблица 6.9

Средние концентрации ХОП в органах симы из р. Бахура, нг/г липидов

α -ГХЦГ	β -ГХЦГ	γ -ГХЦГ	δ -ГХЦГ	o,p' -ДДТ	p,p' -ДДТ	o,p' -ДДД	p,p' -ДДД	o,p' -ДДЕ	p,p' -ДДЕ
Мышцы	7,3 $\pm$ 8,1	2,9 $\pm$ 2,0	1,4 $\pm$ 1,5	2,6 $\pm$ 2,3	3,4 $\pm$ 0,6	3,9	4,9 $\pm$ 4,7	3,9	1,2 $\pm$ 0,3
Печень	58,3 $\pm$ 43,4	5,6 $\pm$ 3,0	4,6 $\pm$ 3,5	8,3 $\pm$ 7,7	<ПО ²	<ПО	<ПО	8,3	<ПО
Икра	7,4 $\pm$ 1,1	4,3 $\pm$ 1,3	0,3 ¹	1,8 $\pm$ 1,3	<ПО	<ПО	2,7 $\pm$ 0,6	<ПО	1,1
Гонады	309,8 $\pm$ 149,6	27,7 $\pm$ 5,8	21,2 $\pm$ 7,2	70,9 $\pm$ 54,9	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО

¹ обнаружено в одном образце² ниже пределов обнаружения

Таблица 6.10

Средние концентрации конгенов ПХБ в органах симы из р. Бахура, нг/г липидов

	ПХБ 28	ПХБ 52	ПХБ 155	ПХБ 101	ПХБ 118	ПХБ 153	ПХБ 138
Мышцы	4,6 $\pm$ 1,3	2,7 $\pm$ 1,5	1,2 $\pm$ 0,8	3,7 $\pm$ 2,1	4,1 $\pm$ 2,0	5,4 $\pm$ 2,0	3,6 $\pm$ 1,4
Печень	42,0 ¹	19,4 $\pm$ 19,0	<ПО ²	9,5 $\pm$ 12,8	<ПО	<ПО	<ПО
Икра	2,3 $\pm$ 1,1	13,8 $\pm$ 0,6	2,0	3,7 $\pm$ 0,1	3,1 $\pm$ 0,8	3,9 $\pm$ 0,9	3,1 $\pm$ 1,5
Гонады	<ПО	29,9	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО

¹ обнаружено в одном образце² ниже пределов обнаружения

Рис. 6.14. Средние концентрации конгенов ПХБ в органах симы из р. Бахура, нг/г липидов

Корреляции между индивидуальными соединениями СОЗ представлены в таблице 6.11.

Из пестицидов, все изомеры ГХЦГ показали средние и сильные положительные корреляции на уровне значимости от $p \leq 0,05$ до $p \leq 0,01$, что свидетельствует о совместном поступлении пестицидов в организм симы. Такая же зависимость наблюдается и между *o,p'*-ДДД и *p,p'*-ДДД ($p \leq 0,01$). *p,p'*-ДДЕ показал очень сильную корреляцию ($p \leq 0,01$) с α -ГХЦГ, что вероятно связано с совместным поступлением токсикантов из хранилищ запрещенных к применению пестицидов, существующих на территории Сахалинской области [8].

ПХБ 155 и ПХБ 101 показали очень сильную отрицательную корреляцию ($p \leq 0,01$) с *p,p'*-ДДЕ. Это может быть связано с возможным образованием этих конгенов из *p,p'*-ДДЕ в организме рыб. В то же время, ПХБ 101 показал среднюю положительную корреляцию ($p \leq 0,05$) с δ -ГХЦГ, ПХБ 52 и ПХБ 155, что может говорить не только о совместном поступлении, но и о том, что эти соединения появляются в организме рыбы одновременно в процессе деградации исходных, поступивших из среды СОЗ. ПХБ 118 показал очень сильные корреляции ($p \leq 0,01$) с 153 и 138 ПХБ, что, вероятнее всего, говорит о едином источнике поступления, как и в случае высокохлорированных ПХБ в рыбах других районов.

Корреляции между органическими соединениями в сите из р. Бахура

ГХЦГ	ДДД										ПХБ	
	α-	β-	γ-	δ-	o,p'-	p,p'-	p,p'-	155	101	118	153	138
α-ГХЦГ	1,000	0,589*	0,862**	0,644*	-0,500	0,054	1,000**	-0,289	0,000	-0,608	-0,554	-0,359
β-ГХЦГ		1,000	0,667*	0,729**	0,400	0,126	-0,400	0,551	0,520	-0,142	-0,203	-0,017
γ-ГХЦГ			1,000	0,794**	0,316	-0,018	0,000	0,235	-0,032	-0,144	-0,027	-0,054
δ-ГХЦГ				1,000	1,000	-0,029	1,000	0,632	0,709*	-0,116	-0,058	-0,029
o,p'-ДДД					1,000	1,000**	-0,500	0,800	0,800	0,800	0,316	0,400
p,p'-ДДД						1,000	-0,200	0,551	0,611	0,517	0,323	0,402
p,p'-ДДЕ							1,000	-1,000**	-1,000**	-0,400	-0,775	-0,800
ПХБ 52								0,456	0,715*	0,387	0,247	0,377
ПХБ 155								1,000	0,899*	0,174	0,162	0,116
ПХБ 101									1,000	0,644	0,525	0,567
ПХБ 118										1,000	0,919**	0,895**
ПХБ 153											1	0,932**
ПХБ 138												1

** Корреляция значима на уровне 0,01 (двухсторонняя) (темно-серые ячейки).

* Корреляция значима на уровне 0,05 (двухсторонняя) (светло-серые ячейки).

Таким образом, основное поступление ДДТ и ПХБ в организм симы вероятно произошло во время нагула. Об этом свидетельствуют большие концентрации этих соединений именно в мышцах рыб, отражающих давнее загрязнение.

Чавыча (*Oncorhynchus tshawytscha*). Образцы отбирались в западной части Берингова моря (побережье п-ова Камчатка) (2010 г) и р. Камчатка (2018 г). В 2010 г. анализировались концентрации ХОП в мышцах и печени, в 2018 – ХОП и ПХБ в мышцах, печени и гонадах. СОЗ обнаружены во всех исследованных образцах (табл. 6.12, 6.13).

В чавыче из *западной части Берингова моря* ХОП обнаружены во всех исследованных образцах в диапазоне от 151,2 до 4219 со средним значением $1277,7 \pm 1026,4$ нг/г липидов. Основную часть ХОП составлял ГХЦГ – от 54,1 до 2168,2 (среднее – $827,9 \pm 664,5$) нг/г липидов. β -ГХЦГ был ниже пределов обнаружения во всех исследованных органах. Из ДДТ и его метаболитов обнаружен только *p,p'*-ДДЕ в широком диапазоне – от 66,6 до 3022,1 (среднее – $449,8 \pm 596,8$) нг/г липидов.

Уровни ХОП в мышцах чавычи варьировали от 265,0 до 2435,4 (среднее – $1240,9 \pm 799,8$) нг/г липидов, в печени – от 151,2 до 4219,0 (среднее – $1304,7 \pm 1192,7$) нг/г липидов (рис. 6.15). Суммарные концентрации ГХЦГ и ДДТ составили в мышцах – $873,5 \pm 687,4$ и $367,4 \pm 256,4$ нг/г липидов, в печени – $794,5 \pm 669,4$ и $510,2 \pm 761,5$ нг/г липидов, соответственно. Средние суммарные концентрации ХОП в мышцах и печени статистически не различались.

В чавыче из *р. Камчатка* диапазон концентраций ХОП варьировал от 7,7 до 70,8 со средним значением $31,4 \pm 23,1$ нг/г липидов. Большую часть ХОП составлял ГХЦГ, варьировавший в пределах 6,4–70,8 (среднее – $28,0 \pm 26,3$) нг/г липидов. Доминирующим изомером был β -ГХЦГ. ДДТ и его метаболиты обнаружены фрагментарно в мышцах и печени и отсутствуют в гонадах. Уровни ДДТ варьировали от 0,4 до 41,4 со средней концентрацией $12,9 \pm 19,1$ нг/г липидов. Наиболее определяемым метаболитом был *o,p'*-ДДЕ – $11,0 \pm 20,1$ нг/г липидов.

Таблица 6.12

Средние концентрации ХОП в органах чавычи, нг/г липидов

α -ГХЦГ	β -ГХЦГ	γ -ГХЦГ	o,p' -ДДТ	p,p' -ДДТ	o,p' -ДДД	p,p' -ДДД	o,p' -ДДЕ	p,p' -ДДЕ
Западная часть Берингова моря								
Мышцы	481,8±426,3	<ПО ¹	391,7±309,1	<ПО	–	<ПО	–	367,4±256,4
Печень	356,7±268,7	<ПО	437,8±443,3	<ПО	–	<ПО	–	510,2±761,5
Река Камчатка								
Мышцы	0,7±0,5	5,6±1,3	1,3 ³	1,2	<ПО	1,1±0,1	4,0	1,3±0,8
Печень	2,3±2,0	31,2±5,9	4,5±3,7	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	20,8±28,8
Гонады	4,9±5,3	29,3±32,1	10,1	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО

¹ ниже пределов обнаружения
² не исследовалось
³ обнаружено в одном образце

Таблица 6.13

Средние концентрации конгенов ПХБ в органах чавычи из р. Камчатка, нг/г липидов

	ПХБ 28	ПХБ 52	ПХБ 155	ПХБ 101	ПХБ 118	ПХБ 153	ПХБ 138
Мышцы	4,7±2,0	5,3±0,8	1,0±0,1	5,0±4,5	7,5±6,6	6,0±5,0	8,9±2,4
Печень	10,5±2,4	8,0±4,5	<ПО ¹	6,3±3,7	3,1±0,7	4,0±1,1	5,7±4,4
Гонады	2,5±0,2	6,7 ²	<ПО	2,3	3,2	<ПО	<ПО

¹ ниже пределов обнаружения
² обнаружено в одном образце

Рис. 6.15. Средние концентрации ГХЦГ, ДДЕ и ХОП в органах чавычи из западной части Берингова моря, нг/г липидов

В мышцах диапазон уровней ХОП варьировал от 8,5 до 15,6 (среднее – $12,0 \pm 5,0$) нг/г липидов (рис. 6.16). Концентрация ГХЦГ составила $6,9 \pm 0,8$ нг/г липидов. γ -ГХЦГ обнаружен в одном образце с концентрацией 1,3 нг/г липидов. ДДТ и его метаболиты определялись фрагментарно. ДДТ составил $5,1 \pm 4,2$ нг/г липидов. Наиболее определяемыми метаболитами были *o,p'*-ДДД и *o,p'*-ДДЕ – $1,1 \pm 0,1$ и $1,3 \pm 0,8$ нг/г липидов, соответственно. В печени чавычи концентрации ХОП достоверно ($p \leq 0,05$) выше, чем в мышцах и варьировали от 30,2 до 46,1 со средним значением $39,1 \pm 8,1$ нг/г липидов. Суммарные уровни ГХЦГ составили $37,9 \pm 11,5$ нг/г липидов. Из ДДТ и его метаболитов в печени обнаружен только *o,p'*-ДДЕ – $20,8 \pm 28,8$ нг/г липидов. В гонадах ХОП варьировали от 7,7 до 70,8 (среднее – $39,3 \pm 44,6$) нг/г липидов и были представлены только ГХЦГ.

Рис. 6.16. Средние концентрации ГХЦГ, ДДТ и ХОП в органах чавычи из р. Камчатка, нг/г липидов

Суммарные концентрации ПХБ в органах чавычи из р. Камчатка варьировали от 2,6 до 52,8, со средним значением $26,1 \pm 16,6$ нг/г липидов. Среди ПХБ, наименее определяемым конгенером являлся ПХБ 155, обнаруженный только в мышцах – $1,0 \pm 0,1$ нг/г липидов. ПХБ 143, 180 и 207 были ниже пределов обнаружения.

В мышцах чавычи суммарные концентрации ПХБ варьировали в пределах 15,2–52,8 (среднее – $34,8 \pm 18,9$) нг/г липидов, в печени – от 15,5 до 38,2 (среднее – $29,0 \pm 11,9$) нг/г липидов, в гонадах – от 2,6 до 14,5 (среднее – $8,6 \pm 8,4$) нг/г липидов. Определены как «легкие» (ПХБ 52 и 28), так и «тяжелые» (ПХБ 101, 118, 153, 138) конгенеры (рис. 6.17)

Рис. 6.17. Концентрации наиболее определяемых конгенов ПХБ в органах чавычи из р. Камчатка, нг/г липидов

Концентрации ХОП в чавыче из Берингова моря (2010 г.) были достоверно ($p \leq 0,05$) выше во всех образцах, чем в рыбах из р. Камчатка (2018 г.), то есть явно прослеживается тенденция к уменьшению концентраций пестицидов в органах рыб во времени. Наблюдается тренд снижения концентраций ГХЦГ и ДДТ, что указывает на постепенное выведение ксенобиотиков из экосистем дальневосточных морей России.

Разница в накоплении СОЗ между рыбами из Берингова моря и р. Камчатка, как и в случае горбуши, может объясняться влиянием Тихоокеанского мусорного пятна. При миграции через этот район, рыбы поглощают частицы микропластика, содержащие СОЗ, что способствует увеличению концентраций ксенобиотиков в их организме. Чавыча, вылов-

ленная в р. Камчатка в 2018 г., вероятно, нагуливалась в северных, более «чистых» районах, ввиду чего обнаруженные в ней концентрации незначительны. Оценить динамику изменения концентраций ПХБ невозможно, так как исследование этих соединений проводилось только в 2018 году.

Соотношение индивидуальных соединений в органах рыб также изменилось. В рыбах из Берингова моря доминирующим изомером был α -ГХЦГ в то время, как в чавыче из р. Камчатка превалировал уже β -изомер. Последнее указывает на деградацию исходного соединения (линдана) до наиболее устойчивой формы и его длительную циркуляцию в экосистеме.

В чавыче из Берингова моря из метаболитов ДДТ обнаружен только p,p' -ДДЕ, в то время как в рыбах из р. Камчатка фрагментарно обнаруживались практически все метаболиты, причем основная часть – в мышцах. Это может отражать как влияние глобального атмосферного переноса, так и локального загрязнения вод р. Камчатка, поскольку известно, что перед нерестом чавыча может залегать на дно нерестового водоема более, чем на месяц [9].

Сильные положительные корреляции ($p \leq 0,01$) между индивидуальными соединениями, обнаруженные в органах чавычи из Берингова моря. Корреляции между изомерами ГХЦГ и p,p' -ДДЕ, вероятнее всего связаны с единым источником или районом поступления токсикантов, как и в случае кеты и горбуши.

В чавыче из р. Камчатка обнаружены сильные положительные корреляции ($p \leq 0,01$) между α -, β - и γ -изомерами ГХЦГ (табл. 6.14), что также указывает на одновременное поступление в организм рыб. o,p' -ДДД показал очень сильные отрицательные корреляции ($p \leq 0,01$) с ПХБ 28 и ПХБ 52. Это может быть связано с превращением ДДД в указанные конгенеры ПХБ или с возможным вытеснением последних во время биоаккумуляции ксенобиотиков. Помимо отрицательных корреляций, o,p' -ДДД сильно коррелировал (прямая связь) ($p \leq 0,01$) с ПХБ 118, ПХБ 153 и ПХБ 138. Это, вероятнее всего, свидетельствует о едином источнике поступления и может отражать влияние стоков со свалок твердых бытовых отходов во время преднерестовой отлежки в водоеме. ПХБ 118 показал сильную корреляцию с γ -ГХЦГ (обратная) ($p \leq 0,01$) и ПХБ 153 (прямая) ($p \leq 0,05$). Это говорит о том, что источники ХОП и ПХБ различные.

Таблица 6.14

**Корреляции между органическими соединениями
в органах чавычи из р. Камчатка**

	ГХЦГ			ДДД	ПХБ				
	α -	β -	γ -	o,p' -	28	52	118	153	138
α - ¹	1,000	0,829*	1,000**	-1,000	-0,257	-0,300	-0,700	0,000	0,000
β - ¹		1,000	1,000**	-1,000	0,086	0,200	-0,029	0,200	-0,800
γ - ¹			1,000	0	-0,200	-0,500	-1,000**	-0,500	-0,500
ДДД ²				1,000	-1,000**	-1,000**	1,000**	1,000**	1,000**
28 ³					1,000	0,000	-0,400	-0,800	-0,800
52 ³						1,000	-0,300	-0,800	-0,800
118 ³							1,000	0,900*	-0,100
153 ³								1,000	0,000
138 ³									1,000

** Корреляция значима на уровне 0,01 (двухсторонняя) (темно-серые ячейки);

* Корреляция значима на уровне 0,05 (двухсторонняя) (светло-серые ячейки);

¹ ГХЦГ; ² o,p' -ДДД; ³ ПХБ

Нерка (*Oncorhynchus nerka*). Образцы отбирались в западной части Берингова моря (побережье п-ова Камчатка) (2011 г), оз. Азабачье (п-ов Камчатка) (2017 г.) и р. Камчатка (восточное побережье п-ова Камчатка) (2018 г.). В 2010 г. анализировались концентрации ХОП в мышцах и печени, в 2017 и 2018 гг. – ХОП и ПХБ в мышцах, печени и гонадах. СОЗ обнаружены во всех исследованных образцах (табл. 6.15, 6.16).

В нерке из *западной части Берингова моря* ХОП обнаружены во всех исследованных образцах в широком диапазоне от 41 до 7103,7 со средним значением $3052,5 \pm 2474,2$ нг/г липидов. Основную часть ХОП составляли изомеры ГХЦГ, суммарные концентрации которых варьировали от 41 до 6581,9 (среднее – $2864,4 \pm 2336,2$) нг/г липидов. Из ДДТ и его метаболитов обнаружен только p,p' -ДДЕ в широком диапазоне от 64,3 до 927,8 (среднее значение – $332,8 \pm 295$) нг/г липидов.

В мышцах диапазон уровней ХОП варьировал от 165,7 до 3020,1 со средней концентрацией $1640,5 \pm 1221,1$ нг/г липидов (рис. 6.18). ГХЦГ и ДДЕ составили $1567,3 \pm 1186,8$ и $117,1 \pm 62,7$ нг/г липидов, соответственно. В печени диапазон ХОП варьировал от 41 до 7103,7 (среднее – $3805,7 \pm 2669,6$) нг/г липидов. Уровни ДДЕ и ГХЦГ обнаружены в концентрациях $467,6 \pm 304,8$ и $3556,2 \pm 2529,5$ нг/г липидов, соответственно.

Таблица 6.15

Средние концентрации ХОП в органах нерки, нг/г липидов

α-ГХЦГ	β-ГХЦГ	γ-ГХЦГ	o,p'-ДДТ	p,p'-ДДТ	o,p'-ДДД	p,p'-ДДД	o,p'-ДДЕ	p,p'-ДДЕ
Западная часть Берингова моря								
Мышцы	1274,3±987,0	<ПО ¹	380,1±273,0	<ПО	–	<ПО	–	117,1±62,7
Печень	2428,7±1705,7	<ПО	1409,5±768,8	<ПО	–	<ПО	–	467,6±304,8
Оз. Азабачье								
Мышцы	<ПО	54±83,5	<ПО	6,4 ³	<ПО	55,0	<ПО	<ПО
Печень	<ПО	46,9±45,9	<ПО	<ПО	<ПО	35,9	<ПО	<ПО
Гонады	<ПО	2,9±2,2	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО	<ПО
Река Камчатка								
Мышцы	3,8±4,6	25,8±17,3	4,5±2,5	6,2	23,2	9,2	18,2	1,7±1,7
Печень	1,2±0,6	17,5	1,3±0,3	<ПО	0,6	6,8	15,3	4,8±0,1
Гонады	5,4±4,8	21,7	1,4±1,5	6,0	<ПО	2,6	<ПО	3,5
								4,2

¹ ниже пределов обнаружения

² не исследовалось

³ обнаружено в одном образце

Таблица 6.16

Средние концентрации конгенов ПХБ в органах нерки, нг/г липидов

	ПХБ 28	ПХБ 52	ПХБ 155	ПХБ 101	ПХБ 118	ПХБ 153	ПХБ 138
Озеро Азабачье							
Мышцы	<ПО ¹	<ПО	<ПО	16,3±12,8	20,2±17,0	14,1±6,5	13,3±5,4
Печень	<ПО	76±98,3	<ПО	12,8±5,5	25,3±18,5	23,8±3,8	25,3±9,7
Гонады	<ПО	<ПО	<ПО	37,7	174,3	79,3	91,9
Река Камчатка							
Мышцы	13,6±13,0	39,8±31,5	<ПО	19,3±12,2	17,8±7,7	16,4±6,7	17,2±4,4
Печень	3,5±0,1	22,5±22,8	1,1 ²	7,8±4,5	7,1±3,6	5,7±2,9	5,8±3,1
Гонады	5,2±5,3	16,5±11,0	<ПО	5,4±2,6	6,2±5,1	5,3±2,4	7,6

¹ ниже пределов обнаружения

² обнаружено в одном образце

Рис. 6.18. Концентрации ГХЦГ, ХОП (А) и ДДЕ (Б) в органах нерки из Берингова моря, нг/г липидов

В нерке из оз. Азабачье диапазон ХОП во всех органах варьировал в пределах 1,4-208,6 (среднее значение – $51,1 \pm 77,5$) нг/г липидов. Из всех изомеров ГХЦГ обнаружена только β -форма с диапазоном от 1,4 до 150,4 (среднее – $38,6 \pm 55,6$) нг/г липидов. ДДТ и его метаболиты обнаруживались единично: *o,p'*-ДДТ – 6,4; *o,p'*-ДДД – 35,9 и 55; *p,p'*-ДДЕ – 3,1 нг/г липидов. Их сумма составила $33,5 \pm 26,0$ нг/г липидов.

В мышцах диапазон концентраций ХОП варьировал от 6,6 до 208,6 (среднее – $75,5 \pm 115,3$) нг/г липидов (рис. 6.19). Уровни β -ГХЦГ составили $54,0 \pm 83,5$ нг/г липидов. Из ДДТ и его метаболитов обнаружены *o,p'*-ДДТ (6,4 нг/г липидов) и *o,p'*-ДДД (35,9 и 55 нг/г липидов). В печени концентрации ХОП варьировали от 19,4 до 135,8 (среднее – $58,9 \pm 66,6$) нг/г липидов. β -ГХЦГ составил $46,9 \pm 45,9$ нг/г липидов. Из ДДТ и его метаболитов обнаружен только *p,p'*-ДДЕ – 3,1 нг/г липидов. В гонадах ХОП были представлены только β -ГХЦГ – $2,9 \pm 2,2$ нг/г липидов.

Рис. 6.19. Концентрации β-ГХЦГ и ΣХОП в органах нерки из оз. Азабачье, нг/г липидов

Уровни ПХБ в органах нерки из оз. Азабачье варьировали от 17,8 до 383,2 со средней концентрацией $134,2 \pm 135,6$ нг/г липидов. Наименее определяемым конгенером был ПХБ 52. Конгенеры 28, 155, 143, 180 и 207 были ниже пределов обнаружения.

В мышцах нерки из оз. Азабачье суммарные концентрации ПХБ находились в пределах 34,3-110,0 (среднее – $63,9 \pm 40,4$) нг/г липидов, в печени – от 17,8 до 256 (среднее – $121,5 \pm 122,0$) нг/г липидов. Наиболее определяемыми ПХБ были 101, 118, 153 и 138 конгенеры (рис. 6.20). В гонадах конгенеры ПХБ обнаружены только в одном образце с концентрациями: ПХБ 101 – 37,7; ПХБ 118 – 174,3; ПХБ 153 – 79,3; ПХБ 138 – 91,9 нг/г липидов.

В нерке из **р. Камчатка** диапазон ХОП варьировал от 18,4 до 117,4 со средним значением $40,7 \pm 38,1$ нг/г липидов. Суммарные концентрации изомеров ГХЦГ находились в пределах 2,4-51,4 (среднее – $21,0 \pm 18,8$) нг/г липидов. Доминирующим изомером был β-ГХЦГ. Большую часть ХОП составляли ДДТ и его метаболиты с диапазоном концентраций от 1,5 до 66,1 (среднее – $23,7 \pm 26,1$) нг/г липидов. Наиболее часто определялись *o,p'*-ДДЕ и *p,p'*-ДДЕ – $3,3 \pm 1,8$ и $3,4 \pm 2,3$ нг/г липидов, соответственно.

В мышцах концентрации ХОП варьировали от 18,4 до 117,4 со средним значением $67,9 \pm 70,0$ нг/г липидов (рис. 6.21). Изомеры ГХЦГ и метаболиты ДДТ составляли примерно равные части – $34,1 \pm 24,4$ и $33,8 \pm$

45,6 нг/г липидов, соответственно. В печени диапазон ХОП составлял от 24,6 до 32,3, со средней концентрацией $28,4 \pm 5,5$ нг/г липидов. Изомеры ГХЦГ, ДДТ и его метаболитов составили $11,2 \pm 12,0$ и $17,2 \pm 17,5$ нг/г липидов, соответственно. В гонадах диапазоны концентраций ХОП варьировали в пределах 18,7-33 (среднее – $25,8 \pm 10,1$) нг/г липидов. ГХЦГ составил $17,7 \pm 21,6$ нг/г липидов. Из метаболитов ДДТ обнаружены *o,p'*-ДДТ, *o,p'*-ДДД, *o,p'*-ДДЕ и *p,p'*-ДДЕ – 6, 2,6, 3,5 и 4,2 нг/г липидов, соответственно.

Рис. 6.20. Средние концентрации наиболее определяемых конгенов в органах нерки из оз. Азабачье, нг/г липидов

Рис. 6.21. Средние концентрации ГХЦГ, ДДТ и ХОП в органах нерки из р. Камчатка, нг/г липидов

Суммарные концентрации ПХБ в органах нерки из р. Камчатка варьировали от 26,3 до 133,4 нг/г липидов со средним значением $73,0 \pm 44,5$. ПХБ 155 обнаружен в одном образце с концентрацией 1,1 нг/г липидов. ПХБ 143, 180 и 207 были ниже пределов обнаружения.

В мышцах уровни ПХБ находились в пределах 114,4-133,4 с суммарной концентрацией $123,9 \pm 13,4$ нг/г липидов. В печени ПХБ варьировали от 26,3 до 79,3 со средним значением $52,8 \pm 37,5$ нг/г липидов. ПХБ 155 обнаружен в одном образце печени – 1,1 нг/г липидов. В гонадах диапазон ПХБ варьировал от 27,3 до 57,3 (среднее – $42,3 \pm 21,2$) нг/г липидов. Во всех образцах обнаружены 28, 52, 101, 118 и 153 ПХБ (рис. 6.22). ПХБ 138 обнаружен во всех пробах мышц и печени.

Рис. 6.22. Средние концентрации конгенов ПХБ в органах нерки из р. Камчатка, нг/г липидов

Уровни ксенобиотиков в органах нерки достоверно различались ($p \leq 0,05$) только в Беринговом море – концентрации ХОП в печени выше, чем мышцах.

Сравнение концентраций в органах нерки из различных частей дальневосточных морей показало, что Σ ДДТ, α - и γ -изомеров ГХЦГ достоверно ($p \leq 0,05$) выше в нерке из Берингова моря, чем в таковых из оз. Азабачье и р. Камчатка (рис. 6.23).

Из конгенеров ПХБ достоверные ($p \leq 0,05$) различия в концентрациях по району показал только ПХБ 153, концентрации которого были выше в оз. Азабачье, чем в р. Камчатка (рис. 6.24).

Если же рассмотреть изменение концентраций СОЗ во времени, то явно виден тренд к снижению уровней ГХЦГ и ДДТ от 2011 года к 2018, причем снижение ГХЦГ более резкое, чем ДДТ. Между 2017 и 2018 годом также наблюдается тенденция к уменьшению концентраций ХОП (уровни ГХЦГ падают более резко, чем ДДТ), однако статистически значимой разницы между 2017 и 2018 гг. не наблюдается. Суммарные концентрации ПХБ также уменьшаются от 2017 к 2018 гг., но статистически не различаются.

Рис. 6.23. Концентрации изомеров ГХЦГ, ДДТ и ХОП в нерке из различных районов дальневосточных морей, нг/г липидов

Корреляции между индивидуальными соединениями в органах нерки из Берингова моря показали сильную взаимосвязь между α- и γ-ГХЦГ, γ-ГХЦГ и p,p' -ДДЕ, что указывает на единый источник поступления соединений в экосистему и организм рыб.

В нерке из оз. Азабачье достоверные корреляции обнаружены только между тяжелыми конгенерами ПХБ: 101 и 118 ($p \leq 0,01$); 138 и 101 ($p \leq 0,05$); 138 и 118 ($p \leq 0,05$); 138 и 153 ($p \leq 0,01$) (табл. 6.17). Это свидетельствует о едином источнике поступления соединений в экосистему и организм нерки.

Таблица 6.17

Корреляции между органическими соединениями в нерке из оз. Азабачье

	β-ГХЦГ	o,p'-ДДД	ПХБ 52	ПХБ 101	ПХБ 118	ПХБ 153	ПХБ 138
β-ГХЦГ	1,000	1,000	1,000	0,0714	0,142	-0,086	-0,029
o,p'-ДДД		1,000	0	1,000	1,000	-1,000	1,000
ПХБ 52			1,000	1,000	1,000	0	0
ПХБ 101				1,000	0,929**	0,771	0,886*
ПХБ 118					1,000	0,771	0,829*
ПХБ 153						1,000	0,943**
ПХБ 138							1,000

** Корреляция значима на уровне 0,01 (двухсторонняя) (темно-серые ячейки).

* Корреляция значима на уровне 0,05 (двухсторонняя) (светло-серые ячейки).

Таблица 6.18

Корреляции между органическими соединениями в нерке из р. Камчатка

	α-ГХЦГ	γ-ГХЦГ	o,p'-ДДД	o,p'-ДДЕ	p,p'-ДДЕ	ПХБ 28	ПХБ 52	ПХБ 101	ПХБ 118	ПХБ 153	ПХБ 138
α-ГХЦГ	1,000	0,429	0,500	0,000	1,000*	-0,086	-429	-0,143	-0,200	-0,145	0,300
γ-ГХЦГ		1,000**	1,000	-0,500	0,200	0,829*	-029	0,314	0,429	0,522	0,700
o,p'-ДДД			1,000	-0,500	0,500	1,000**	-500	1,000**	0,500	1,000**	1,000**
o,p'-ДДЕ				1,000	0,200	-0,600	-600	-0,500	-0,900*	-0,800	-0,800
p,p'-ДДЕ					1,000	-0,400	-1,000**	0,400	0,400	0,200	0,200
ПХБ 28						1,000	0,086	-0,086	0,086	0,203	0,600
ПХБ 52							1,000	0,543	0,543	0,638	0,400
ПХБ 101								1,000	0,829*	0,928**	0,900*
ПХБ 118									1,000	0,928**	0,900*
ПХБ 153										1,000	1,000**
ПХБ 138											1,000

** Корреляция значима на уровне 0,01 (двухсторонняя) (темно-серые ячейки).

* Корреляция значима на уровне 0,05 (двухсторонняя) (светло-серые ячейки).

Рис. 6.24. Концентрации (медианы) ПХБ 153 в нерке из оз. Азабачье и р. Камчатка, нг/г липидов

В нерке из р. Камчатка также обнаружены достоверные корреляции (табл. 6.18). Положительные корреляции между «ХОП-ХОП», ХОП-ПХБ» и «ПХБ-ПХБ» в основном указывают на единый источник поступления ксенобиотиков. Можно предположить, что основным источником этих соединений являются стоки со свалок твердых бытовых отходов.

Таким образом, на сегодняшний день нагрузка СОЗ на дальневосточные моря России значительно снизилась. Во всех исследованных видах видна тенденция к уменьшению концентраций СОЗ, что, вероятнее всего, отражает последствия государственных и федеральных мероприятий по уменьшению использования этих соединений. Обнаруженные корреляции позволяют предположить, что ксенобиотики активно деградируют как под действием абиотических факторов окружающей среды, так и посредством защитных функций организма гидробионтов. Тем не менее говорить о полном выходе СОЗ из экосистем мирового океана рано, так как он все еще остается конечным резервуаром всех загрязняющих веществ.

6.1.2. Межвидовые различия в аккумуляции СОЗ тихоокеанскими лососями Охотского и Берингова морей

Род тихоокеанских лососей включает в себя 6 видов (горбуша, кета, сима, нерка, кижуч и чавыча), широко распространенных в северной части Тихого океана. Все лососи размножаются в пресных водоемах единожды и

погибают после нереста. Время нагула каждого вида в океанических водах различается: у горбуши – 1,5 года, у кеты – 3, у симы – 2,5; у нерки – 4,5, у чавычи – 5 лет [9]. Разница в уровнях накопления СОЗ у разных видов тихоокеанских лососей, прежде всего, может объясняться продолжительностью нагула, и, соответственно, разным накоплением ксенобиотиков в течение жизни (например, чавыча до 99 % всех поллютантов накапливает именно в море [15]). Другим важным фактором в накоплении ксенобиотиков является «жирность» рыб, поскольку СОЗ – липофильные ксенобиотики.

В последнее время, работ, направленных на определение стойких органических загрязняющих веществ в лососях, становится все меньше. В наиболее современных публикациях объектом исследования диких лососей является чавыча – самый крупный и долгоживущий вид, имеющий наибольшее промысловый в странах Северной Америки и Европы [12, 15, 30, 47]; выращенных – семга. Горбуша и кета изучаются либо как компонент пищевой цепи, либо во время мониторинговых программ (Например, Fish Monitoring Program на Аляске) [11, 21]. Сима исследуется только учеными Японии, так как этот вид, распространенный только в азиатских водах. Список исследуемых образцов также обширен – от отдельных органов до всей тушки целиком, что затрудняет сравнение результатов. В связи с этим результаты наших исследований (табл. 6.19) представлены в виде средних концентраций СОЗ в каждом исследованном органе.

При сравнении уровней аккумуляции СОЗ во всех органах лососей, в образцах 2010–2013 гг. выявляется следующая закономерность в изменении концентраций ХОП по видам:

$$\text{Горбуша} < \text{Кета} < \text{Чавыча} < \text{Нерка},$$

что может быть связано с различиями в содержании липидов в органах рыб и геохимическими особенностями среды исследованных районов. В то же время эта закономерность распределения поллютантов по видам рыб из оз. Азабачье и р. Камчатка нарушалась и выглядела иначе:

$$\text{Нерка} < \text{Горбуша}; \text{Чавыча} \sim \text{Кета} < \text{Нерка}, \text{ соответственно.}$$

Этот факт связан с разным возрастом рыб и количеством липидов в тканях.

Распределение СОЗ по липидам органов рыб почти во всех образцах соответствует следующему порядку:

$$\text{мышцы} < \text{печень} < \text{икра} < \text{гонады самцов.}$$

Таблица 6.19

**Концентрации СОЗ (нг/г липидов), обнаруженные
в тихоокеанских лососях дальневосточных морей России**

Вид	Год	Район	Орган	ΣГХЦГ	ΣДДТ	ΣПХБ
Горбуша	2012	Охотское море (прикурильские воды)	Мышцы	132±49	9±6	— ¹
			Печень	259±144	30±21	—
			Икра	279±139	10±6	—
			Гонады	600±60	44±5	—
	2017	оз. Азабачье (п-ов Камчатка)	Мышцы	18±12	45±65	33±17
			Печень	69±70	<ПО ²	37±45
			Гонады	52±34	65 ³	596±203
		р. Поронай (во- сточное побережье о. Сахалин)	Мышцы	23±28	6±7	19±8
			Печень	45±40	5±4	18±21
			Икра	39±53	3±3	25±11
			Гонады	84±37	3±2	6±4
			Гонады	84±37	3±2	6±4
Кета	2013	Охотское море (прикурильские воды)	Мышцы	111±41	14±7	—
			Печень	166±80	21±9	—
			Икра	1472±587	<ПО	—
			Гонады	2628±1342	333±40	—
	2018	р. Камчатка	Мышцы	2±2	4±5	41±5
			Печень	6±7	3±3	27±9
			Икра	4	0,3	68
			Гонады	3±3	<ПО	29±27
Сима	2017	р. Бахура (восточное побе- режье о. Сахалин)	Мышцы	12±12	8±9	24±12
			Печень	75±46	8	25±45
			Икра	14±2	3±1	31±1
			Гонады	305±179	<ПО	30
Чавыча	2010	Берингово море (западная часть)	Мышцы	873±687	367±256	—
			Печень	794±669	510±762	—
	2018	р. Камчатка	Мышцы	7±1	5±4	7±1
			Печень	38±12	21±29	29±12
			Гонады	39±45	<ПО	9±8
Нерка	2011	Берингово море (западная часть)	Мышцы	1567±1187	117±63	—
			Печень	3556±2529	468±305	—
	2017	оз. Азабачье (п-ов Камчатка)	Мышцы	54±84	32±37	64±40
			Печень	47±46	36	122±122
			Гонады	3±2	<ПО	383
	2018	р. Камчатка	Мышцы	34±24	34±46	124±13
			Печень	11±12	17±17	53±37
			Гонады	18±22	16	42±21
			Гонады	18±22	16	42±21

¹ не исследовалось; ² ниже пределов обнаружения; ³ обнаружено в одном образце

Сравнение общего количества ХОП в мышцах и печени всех четы-
рех видов рыб 2010–2013 гг. вылова показало, что у горбуши и кеты сред-
ние значения концентраций значимо не различаются, но они достоверно

($p \leq 0,05$) меньше, чем у чавычи, а у последней – меньше, чем у нерки (рис. 6.25). Горбуша и кета были собраны в начале лета в районе Южных Курил, во время нерестовых миграций, когда органы уже начинают расходовать липиды. Перед нерестом лососи расходуют до 80% своих резервных липидов, при этом удельная концентрация токсиканта на 1 г липидов увеличивается и может достигать значений, опасных для жизни рыб [13]. Образцы нерки и чавычи были собраны в западной части Берингова моря осенью, в октябре-ноябре, когда рыбы нагуливаются в море, где могут провести несколько лет. За это время концентрация токсикантов в органах последовательно возрастает не только в метаболически активной печени, но и в мышцах.

В мышцах и печени лососей 2017–2018 гг. вылова уровни содержания ХОП статистически не различались (рис. 6.26). Наиболее высокие концентрации ХОП в печени обнаружены у симы, что может быть связано с самым большим количеством липидов (до 20 %) в этом органе среди всех исследованных рыб. В мышцах наибольшие концентрации ксенобиотиков обнаружены у нерки, что, в свою очередь, может отражать увеличение удельной концентрации токсикантов, в ходе перераспределения липидов при формировании половых продуктов. На это указывает обнаруженная «жирность» органа – до 1,1 % липидов. Суммарные концентрации ПХБ в мышцах показали достоверные ($p \leq 0,05$) различия среди всех исследованных лососей, причем наибольшие концентрации также обнаружены в нерке (рис. 6.27). В печени уровни токсиканта статистически не различались.

В половых продуктах закономерность «больше липидов–больше СОЗ» не прослеживается из-за меньшей «жирности» гонад самцов, по сравнению с икрой. В работе [24] разница в накоплении СОЗ между половыми продуктами самцов и самок объяснялась тем, что во время созревания икры самки мобилизуют большее количество липидов, и к нересту икра составляет до 20 % массы всей рыбы. Таким образом, СОЗ «разбавляются» и распределяются в большей части органа, поэтому их концентрации меньше, чем в гонадах самцов. При этом указанное распределение токсикантов по органам не постоянно. Так, в работе [16] уровни ПХБ в мышцах были в два раза выше таковых в половых продуктах, а другие авторы [26] не обнаружили различий в концентрациях поллютантов между гонадами самцов и самок. Однако в послед-

нем исследовании отмечается, что во время отбора образцов рыбы не были готовы к нересту.

Рис. 6.25. Суммарные концентрации ХОП (ГХЦГ+ДДТ) (медиана) в органах тихоокеанских лососей 2010-2013 годов вылова, нг/г липидов

Рис. 6.26. Суммарные концентрации ХОП (ГХЦГ+ДДТ) (медиана) в органах тихоокеанских лососей 2017–2018 гг. вылова, нг/г липидов

Рис. 6.27. Суммарные концентрации ПХБ (медиана) в органах тихоокеанских лососей 2017–2018 гг. вылова, нг/г липидов

Данные о концентрациях СОЗ в органах тихоокеанских и атлантических лососей различных районов мира представлены в таблице 6.20. Сравнение содержания загрязнителей в органах лососевых рыб из ДВ морей с данными для других регионов Мирового океана показывает, что в дальневосточных рыбах ГХЦГ превалирует над ДДТ, в то время как почти во всех других районах ситуация противоположная. На северном побережье российского Дальнего Востока практически не использовали ДДТ, в отличие от линдана (γ -ГХЦГ) или технического ГХЦГ (доминирует α -форма), которые, в отличие от ДДТ, обладают большей летучестью, и выявляются, как правило, в северных и умеренных широтах. На территории России присутствуют могильники пестицидов и ядохимикатов, расположенные на о. Сахалин и п-ове Камчатка [4, 8], что также может оказывать влияние на накопление поллютантов в водных массах и морских организмах, в том числе рыбах. Воздушный перенос с суши тоже является источником пестицидов, поступающих в экосистемы морей. На территории Китая долгое время использовался и используется до сих пор технический ГХЦГ. Его остаточные количества постоянно обнаруживаются как в наземных, так и в морских организмах. Так, в донных отложениях оз. Байкал концентрации ГХЦГ в 3 раза превышают уровень ДДТ [10].

Таблица 6.20

**Суммарные концентрации СОЗ (нг/г липидов) в мышцах
тихоокеанских и атлантических лососей из различных районов**

Вид	Орган	Год отбора	Район отбора	ΣГХЦГ	ΣДДТ	ΣПХБ	Ссылка
Горбуша	Мышцы	1999-2000	Чукотское море	22	29	42	[25]
		2013	Аляска	42	38	–	[20]
Кета	Тушка	2006-2010	Остров Татуш (США)	– ¹	100	385	[21]
Сима	Мышцы	2003	Бухта Отсучи (Япония)	20	80	–	[40]
	Печень			21	105	–	
	Мышцы	2008-2010	Река Нагара (Япония)	–	–	600	[36]
Чавыча	Мышцы	1975-2013	Озеро Онтарио (США)	–	–	7701	[47]
	Тушка ³	1999-2000	Рыбоводный завод Китимат (Канада)	–	–	397	[30]
	Мышцы	2000	Пролив Джонстон (Канада)	23	15	91	[15]
	Тушка		Пролив Джорджии (США)	125	504	1383	
	Мышцы	2001	Река Кредит (Канада)	<ПО	170	371	[39]
	Тушка	2005-2009	Река Коламбия (США)	<ПО ²	1800	4100	[28]
	Тушка	2006-2010	Остров Протекшн (США)	–	700	944	[21]
	Мышцы	2007	Река Шусвап (Канада)	10	67	75	[31]
	Икра			8	46	63	
	Тушка ³	2008	Рыбоводный завод Рэпид Ривер (США)	135	850	780	[12]
Нерка	Мышцы	2007	Река Адамс, нерестилище (Канада)	2	830	437	[31]
	Икра			4	86	134	
	Мышцы	2012	Толмачевское водохранилище (п-ов Камчатка)	2	23	44	[6]
	Печень			1	11	27	
	Икра			2	15	29	
	Гонады			3	33	56	
Семга ³	Мышцы	1999	Шотландия	19	250	460	[27]
	Мышцы	1999	Норвегия	10	47	279	
	Мышцы	2001	Ирландия	39	49	284	
	Мышцы	2003-2004	Канада	14	212	115	[43]
Чавыча ⁴	Мышцы	2002	Река Кенай (США)	2	10	11	[41]
	Икра			4	8	9	
	Тушка	2013-2014	Великие озера (Мичиган и Гурон) (США)	–	–	380	[19]
	Мышцы	2007	Северная Патагония (Чили)	–	–	28	[37]
	Икра ³	2004-2014	Рыбоводный завод Салмон Ривер Фиш (США)	–	–	1,6	[18]

¹ не исследовалось

² ниже пределов обнаружения

³ выращенная

⁴ нг/г сырой массы

При сравнении уровней ПХБ в лососях из дальневосточных морей и других районов Мирового океана видно, что практически во всех образцах Дальнего Востока России концентрации этих поллютантов меньше. Исключение составляет лишь горбуша из оз. Азабачье, где суммарная концентрация ПХБ составила 596 нг/г липидов. Заметим, что большая часть рыб, с которыми проводилось сравнение, выловлены в Атлантике. При изучении аккумуляции пестицидов у лососей, мигрирующих к Американскому континенту, авторы обращают внимание на высокую урбанизацию прибрежных районов, и, как следствие, загрязнение нерестовых водотоков. При этом развитие икры и последующий рост мальков также происходят в загрязненной воде, что существенно сказывается на жизнестойкости молоди [21] и повышает концентрации СОЗ в их органах. Так, в работе [28] показано, что с увеличением возраста мальков чавычи, концентрации ПХБ значительно возрастают: от 1300 до 4100 нг/г липидов.

В настоящее время значительную часть лососевых на мировом рынке представляют атлантические лососи, выращенные в садках. Содержание ХОП в их органах строго контролируется, однако загрязнение среды обитания приводит к аккумуляции токсикантов в объектах аквакультуры [27]. Сравнение уровней содержания СОЗ в тихоокеанских лососях с семгой показывает, что концентрации ПХБ в мышцах последней выше, чем у исследованных в работе видов. Заметим, что семга, с которой проводится сравнение, выращена в садках, а значит имела минимальный контакт с открытыми океаническими водами. Более высокие уровни ПХБ в тканях выращиваемых атлантических лососей могут быть связаны как с высоким содержанием липидов в их тканях (до 20 %) [31], так и с высокой антропогенной нагрузкой в прибрежной зоне, где расположены садки с лососями. Концентрации ДДТ почти во всех тихоокеанских лососях ниже, чем таковые в семге. Исключение составляет лишь чавыча 2010 г. вылова. Концентрации ГХЦГ в тихоокеанских лососях, в среднем, выше, чем в атлантических.

Таким образом, уровни ГХЦГ в тихоокеанских лососях дальневосточных морей России в целом выше, чем в лососевых из других районов Мирового океана, что отражает широкое использование линдана и технического ГХЦГ на побережье Дальнего Востока России в XX веке. Концентрации ДДТ, напротив, ниже, по сравнению с мировым уровнем и, чаще всего отражают глобальный перенос ксенобиотиков водными и воздушными массами. Концентрации ПХБ в тихоокеанских лососях Дальнего

Востока не показали единой тенденции к повышению или понижению их уровней, по сравнению с миром. Однако в литературе отмечается, что содержание этих загрязняющих веществ выше в закрытых водоемах с низким водообменом (великие озера США) [47], странах с высоким использованием ПХБ-содержащих материалов в прошлом (Япония) [36], в районах выращивания рыбы, и на рыбоводных заводах [12, 30].

6.2. Камбалы (род *Hippoglossoides*)

Палтусовидные камбалы (*Hippoglossoides* Gottsche, 1835) выловлены в восточной (у берегов Камчатки) и южной (у берегов Курильских островов) частях Охотского моря, в зал. Невельского у юго-западного побережья о. Сахалин (Татарский пролив) и в б. Рифовая залива Петра Великого (Японском море) летом в 2016–2018 гг.

Охотское море. Концентрации ХОП в рыбах восточной части Охотского моря находились в диапазоне 13,6–433,7 нг/г липидов со средней концентрацией $99,8 \pm 125,4$ нг/г липидов. Суммарные уровни ГХЦГ и ДДТ составляли от 13,6 до 158 (среднее $50,2 \pm 52$) и от 0,55 до 276 (среднее – $62 \pm 89,2$) нг/г липидов, соответственно. Диапазон концентраций ХОП в рыбах из южной части Охотского моря составлял 11,4–141 нг/г липидов со средней концентрацией в $53,6 \pm 40,5$ нг/г липидов. Суммарные уровни ГХЦГ и ДДТ изменялись от 3,3 до 103 (среднее $35,5 \pm 36,7$) и от 1,2 до 44,8 (среднее – $20,1 \pm 16,8$) нг/г липидов, соответственно.

Из изомеров ГХЦГ в восточной части Охотского моря наиболее определяемой была β -форма с концентрацией 13,6–157,8 нг/г липидов (среднее – $49,38 \pm 50,7$ нг/г липидов) (рис. 6.28). α -ГХЦГ определен только в одном образце в концентрации 7,9 нг/г липидов. Содержание γ -ГХЦГ было ниже пределов обнаружения во всех образцах. Среди ДДТ и его метаболитов *o,p'*-ДДТ, *p,p'*-ДДТ и *p,p'*-ДДЕ были ниже пределов обнаружения во всех исследованных пробах. Концентрации *o,p'*-ДДД и *p,p'*-ДДД варьировали в диапазоне от 6,24 до 45,21 (среднее – $23,12 \pm 19,1$) и 12,8–276 (среднее – $72,3 \pm 114,2$) нг/г липидов, соответственно. *o,p'*-ДДЕ обнаружен в двух образцах в концентрациях 0,55 и 41,68 нг/г липидов.

В южной части Охотского моря ГХЦГ представлен α - и β -изомерами с концентрациями 2–11,8 (среднее – $5,4 \pm 3,7$) и 1,1–96,2 (среднее – $40,4 \pm 37$) нг/г липидов, соответственно (рис. 6.28). Уровни γ -ГХЦГ были ниже пределов обнаружения во всех исследованных образцах. Среди ДДТ и его метаболитов концентрации *o,p'*-ДДТ были ниже пределов обнаружения во всех рыбах. *p,p'*-ДДТ, *p,p'*-ДДД и *o,p'*-ДДЕ определялись единично в концентрациях 7,1, 22,8 и 33 нг/г липидов, соответственно. Концентрации *o,p'*-ДДД варьировали в диапазоне от 2 до 44,8 нг/г липидов, со средней концентрацией $16,7 \pm 17,6$ нг/г липидов. *p,p'*-ДДЕ обнаружен в диапазоне концентраций 1,22–6,8 нг/г липидов, со средней концентрацией $4,3 \pm 2,3$ нг/г липидов.

Рис. 6.28. Концентрации СОЗ в камбалах Охотского моря, нг/г липидов

Сумма концентраций ПХБ в камбалах из восточной части Охотского моря варьировала от 23,5 до 279,1 (среднее – $124,5 \pm 90,8$) нг/г липидов. ПХБ представлены, в основном, 101 и 153 конгенерами. 28, 52, 155, 118, 138 и 180 ПХБ обнаруживались эпизодически (в одном-двух образцах) в концентрациях: 28 – 40,5 и 19,1; 52 – 32,7; 155 – 71,2; 118 – 20,6 и 70,6; 138 – 107,8 и 35,3; 180 – 66,3 нг/г липидов. Концентрации ПХБ 207 были ниже пределов обнаружения во всех исследованных пробах. Концентра-

ции ПХБ 101 и ПХБ 153 варьировали от 11 до 81 (среднее – $42,3 \pm 27,1$) и от 49,4 до 117,2 (среднее – $49,4 \pm 36,8$) нг/г липидов, соответственно.

Сумма концентраций ПХБ в образцах из южной части Охотского моря варьировали в пределах от 24,7 до 150 (среднее – $98,6 \pm 42,5$) нг/г липидов. ПХБ представлен 28, 101, 118, 153 и 138 конгенерами в концентрациях 6,2–11,9, 5,2–30,3, 15,4–50, 17,5–55 и 34,4–50,7 нг/г липидов, соответственно. Средние концентрации составили $9,4 \pm 2,3$, $18 \pm 8,8$, $38 \pm 12,6$, $35 \pm 15,2$ и $44 \pm 7,2$ нг/г липидов, соответственно (рис. 6.28). ПХБ 52, 155 и 180 обнаруживались эпизодически в следующих концентрациях: 52 – 14,2 и 4,6; 155 – 16,9; 180 – 17,3 и 11,7 нг/г липидов, соответственно. Концентрации ПХБ 143 и ПХБ 207 были ниже пределов обнаружения во всех образцах.

Татарский пролив. Диапазон концентраций ХОП в образцах из Татарского пролива составлял от 37,4 до 555,1 нг/г липидов (среднее – $223,9 \pm 180$ нг/г липидов). Уровни Σ ГХЦГ варьировали от 37,4 до 555,1 со средним значением $221,3 \pm 181,8$ нг/г липидов. ДДТ и его метаболиты обнаружены в трех образцах и представлены *p,p'*-ДДД и *p,p'*-ДДЕ с концентрациями: *p,p'*-ДДД – 15; *p,p'*-ДДЕ – 5,8 и 12,9 нг/г липидов. ГХЦГ в образцах из Татарского пролива представлен только β -изомером с диапазоном концентраций 37,4–555,1 нг/г липидов, среднее – $221,3 \pm 181,8$ нг/г липидов (рис. 6.29).

Рис. 6.29. Концентрации СОЗ в камбалах Татарского пролива, нг/г липидов

Диапазон суммы концентраций ПХБ составлял 193,4–1383,9 нг/г липидов (со средним значением в $454,9 \pm 317,1$ нг/г липидов). В камбалах из Татарского пролива обнаружены 28, 52, 155, 101, 118, 143, 153, 138 и 180 конгенеры ПХБ. Концентрация ПХБ 207 была ниже предела обнаружения во всех образцах. Концентрации конгенов варьировали: для 28 – от 4,1 до 61; 52 – от 3,1 до 286,6; 155 – от 2,7 до 78; 101 – от 23 до 107,9; 118 – от 19,5 до 325,5; 143 – от 25,4 и 56,3; 153 – от 38 до 291,2; 138 – от 8,7 до 423,4 и для 180 – от 28,4 до 105,6 нг/г липидов, соответственно. Средние концентрации составили $28,8 \pm 20,8$, $80,3 \pm 82,6$, 30 ± 28 , $45,4 \pm 22,7$, $84,5 \pm 79,6$, $43,8 \pm 12,7$, $118,3 \pm 72,2$, $121,2 \pm 109,4$ и $58,7 \pm 29,4$ нг/г липидов, соответственно (рис. 6.29). 101 ПХБ обнаружен во всех образцах.

Зал. Петра Великого, Японское море. Диапазон концентраций ХОП в рыбах из б. Рифовая, зал. Петра Великого составлял 37,8–192,8 нг/г липидов со средней концентрацией $102,1 \pm 50$ нг/г липидов. Изомеры ГХЦГ и ДДТ и его метаболиты обнаружены во всех пробах. Уровни Σ ГХЦГ и Σ ДДТ изменялись от 29,4 до 134,2 и от 8,5 до 87,5 нг/г липидов, соответственно. Средние концентрации – $62,2 \pm 36,3$ и $40 \pm 29,4$ нг/г липидов, соответственно.

В камбалах из Японского моря обнаружены все изомеры ГХЦГ. Концентрации α -, β - и γ -изомеров варьировали в пределах: 0,4–4,7; 26,7–126,9; 0,9–6,1 нг/г липидов, соответственно. Средние концентрации составили для α -ГХЦГ – $2 \pm 1,4$, β -ГХЦГ – $59,2 \pm 34,6$, γ -ГХЦГ – $2,2 \pm 2,2$ нг/г липидов (рис. 6.30). β -изомер обнаружен во всех исследованных пробах.

Из ДДТ и его метаболитов не был обнаружен *o,p'*-ДДТ, а *p,p'*-ДДТ найден только в одном образце (5,6 нг/г липидов). Диапазоны концентраций *o,p'*-ДДД, *p,p'*-ДДД, *o,p'*-ДДЕ и *p,p'*-ДДЕ варьировали в пределах: 1,3–37,5; 5,6–52,4; 1–33,7; 3,6–46,6 нг/г липидов, соответственно. Средние концентрации составили: $11,6 \pm 11,9$, $18,7 \pm 17,5$, $7,4 \pm 10,1$ и $15,7 \pm 16,4$ нг/г липидов, соответственно (рис. 6.30).

Концентрации ПХБ изменялись от 421,3 до 3715,6 нг/г липидов. Средняя концентрация – $1615,7 \pm 1176,8$ нг/г липидов. ПХБ представлены 28, 52, 155, 101, 118, 143, 153, 138 и 180 конгенерами. Содержание ПХБ 207 было ниже пределов обнаружения во всех образцах. Концентрации конгенов варьировали: 28 ПХБ – от 2,7 до 405,4; 52 ПХБ – от 7,3 до 287,3; 155 ПХБ – от 3,1 до 10,8; 101 ПХБ – от 40,2 до 206,6; 118 ПХБ – от 53 до 581,4; 143 ПХБ – от 11,4 до 45,5; 153 ПХБ – от 125,7 до 848,9;

138 ПХБ – от 126,3 до 936,2; 180 ПХБ – от 27,7 до 1834,7 нг/г липидов. Средние концентрации вышеуказанных конгенов составили $54 \pm 131,9$; $53,8 \pm 88,4$; $6,4 \pm 3,4$; $117,1 \pm 57,6$; $241,4 \pm 182,7$; $25,5 \pm 14,5$; $387,4 \pm 265,1$; $428,7 \pm 279,2$; $318,4 \pm 579,2$ нг/г липидов, соответственно (рис. 6.30).

Рис. 6.30. Концентрации СОЗ в камбалах Японского моря, нг/г липидов

Камбаловые (семейство *Pleuronectidae*) относятся к наиболее часто встречающимся представителям донной ихтиофауны, заселяющим весь шельф и материковый склон. Основной особенностью биологии камбал является их малоподвижный образ жизни: они лежат на грунте или плавают, оставаясь при этом в пределах своего ареала, совершая лишь сезонные миграции в глубоководные районы и, таким образом, могут выступать биоиндикаторами локального загрязнения. По характеру питания камбаловые разделяются на три большие группы: хищники, виды со смешанным питанием (большеротые камбалы) и типичные бентофаги (малоротые камбалы) [9]. Изучаемые нами палтусовидные камбалы (род *Hippoglossoides*) относятся к группе камбал со смешанным типом питания: в составе пищи встречаются как типично бентосные (креветки, двустворчатые моллюски и др.), так и планктонные животные. Также пищей камбал нередко становится молодь сельди, корюшки и другие мелкие рыбы. Пищевой спектр сильно зависит от места обитания. У юго-востока Саха-

лина и в Японском море в питании преобладают исключительно моллюски, в то время как в юго-восточной части Берингова моря палтусовидная камбала в нижних отделах шельфа и на свале потребляет в основном иглокожих и чилимов, на мелководье – планктонные организмы [7, 9]. Таким образом, различия в накоплении СОЗ в камбалах из разных мест могут быть связаны как с антропогенной нагрузкой на район обитания, так и со способностью к биоаккумуляции у потребляемых организмов.

В восточной части Охотского моря в рыбах обнаружены наибольшие концентрации ДДТ и умеренные – ГХЦГ, что может быть связано с расположением на полуострове Камчатка хранилищ ядохимикатов и пестицидов, где захоронены альдрин, дильдрин, гексахлорбензол и хлорорганические пестициды [2, 4]. ДДД был наиболее встречаемым метаболитом ДДТ; ГХЦГ же был представлен наиболее стойким β -изомером, что говорит о длительной циркуляции обоих токсикантов в экосистеме и распаде исходных соединений до более устойчивых форм. Нарушение герметичности захороненных резервуаров и испарение токсикантов с последующим атмосферным переносом, возможно, являются основными источниками загрязнения в этом районе, так как сельское хозяйство на западной стороне полуострова Камчатка мало развито из-за неблагоприятных природных условий. Поступление ПХБ в Охотское море может быть обусловлено как активной судоходной деятельностью, так и испарением из пластификаторов. На текущий момент на территории Камчатского края отсутствуют мусороперерабатывающие заводы, мусор захоранивают на специальных полигонах, откуда возможны утечки [2].

Южная часть Охотского моря является наиболее чистым в отношении исследованных СОЗ районом и характеризуется низким содержанием ДДТ, ГХЦГ и ПХБ в рыбах. Юг Охотского моря расположен далеко от всех наземных источников загрязнения. Помимо этого, в районе наблюдается активная гидродинамика и обмен вод с Тихим океаном через Курильские проливы, что может перераспределять СОЗ в водной толще. Концентрации ксенобиотиков в мышцах камбал из южной части Охотского моря могут быть приняты как фоновые и использоваться для оценки загрязнения других морских районов [34].

Наиболее неожиданными и интересными являются данные по содержанию ХОП в мышцах камбал из Татарского пролива. В образцах практически отсутствовал ДДТ, что позволяет оценивать район как непод-

верженный серьезному загрязнению этим пестицидом. Однако в этих же образцах обнаружены самые высокие уровни ГХЦГ (рис. 6.31). При этом ГХЦГ представлен только β -изомером, что говорит о длительной циркуляции токсиканта в экосистеме.

Рис. 6.31. Концентрации ГХЦГ в камбалах исследуемых районов, нг/г липидов

Крупные сельскохозяйственные предприятия как со стороны о. Сахалин, так и со стороны материка находятся вдали от пролива. Однако, согласно постановлению администрации Сахалинской области (22 сентября 2008 г.), на территории острова существуют полигоны размещения пришедших в негодность или запрещенных к использованию пестицидов, хранение которых (на момент постановления), осуществлялось с нарушениями, способными привести к серьезному загрязнению окружающей среды [3, 8]. Скорее всего, источником загрязнения пролива стали именно они, что привело к попаданию ГХЦГ в экосистему Татарского пролива. На это указывает и обнаруженный β -изомер ГХЦГ, считающийся наиболее

устойчивым. Другим источником ГХЦГ могут быть течения, выносящие воды Японского моря через Татарский пролив в Охотское море.

Концентрации ПХБ в камбалах из Татарского пролива в несколько раз выше, чем в рыбах из Охотского моря, но заметно ниже, чем из Японского. Высокие концентрации ПХБ могут быть связаны с активным судоходством и возможным влиянием свалок бытовых отходов на западном побережье Сахалина (на территории Сахалинской области существует 54 санкционированных и 37 несанкционированных свалок) [3].

Татарский пролив – важный промысловый район, где осуществляется активная рыболовная и транспортная деятельность. Теплое течение из Японского моря и холодное из Охотского, «зажатость» между материком и островом, оказывают значительное влияние на накопление токсикантов в этом районе. Таким образом, основным источником ПХБ в водах Татарского пролива, вероятно, является именно суда.

В камбалах Японского моря из метаболитов ДДТ обнаружены ДДД и ДДЕ, из изомеров ГХЦГ – α -, β - и γ -изомеры. Приморский край является развитым в сельскохозяйственном отношении регионом, и в середине XX века здесь широко использовались пестициды, в том числе и хлорорганические. Эти устойчивые соединения могли остаться в почвах и сейчас выносятся в акваторию Японского моря путем речных и поверхностных стоков. Кроме того, на территории края существуют места захоронения пестицидов, которые могут быть еще одним источником поступления токсикантов в среду. И, наконец, согласно Стокгольмской конвенции, развивающиеся страны Азии (наши соседи) могут использовать ДДТ для защиты населения от переносчиков малярии и ГХЦГ как лечебное средство от вшей и чесотки [44]. Японское море выходит к берегам Китая, Северной и Южной Кореи, а с южной стороны через Корейский пролив связано с Восточно-Китайским морем. Пестициды могут попадать в морские экосистемы путем атмосферного переноса, речных стоков и течений из Восточно-Китайского моря, несущих их остатки с сельскохозяйственных угодий, а также с промышленными и поверхностными стоками. Наиболее существенным источником ДДТ и ГХЦГ может быть Китай. Так, авторы из Китая [22] показали, что наибольшую опасность для биоты со стороны Китая несет именно ДДТ. В мышцах камбал ДДТ был представлен его метаболитами – ДДД и ДДЕ, и лишь в одном случае был обнаружен ДДТ, что говорит о давности загрязнения и распаде исходного соединения.

Наиболее актуальными являются данные о концентрации ПХБ в мышцах рыб из Японского моря. Выявленные уровни этих поллютантов в мышцах камбал из Японского моря на порядок величин выше, чем в рыбах из Охотского моря и Татарского пролива (рис. 6.32). На берегах Японского моря (юг Приморского края) расположено огромное количество баз отдыха и так называемых «диких» пляжей. Ежегодно на побережье приезжают тысячи людей как с Дальнего Востока, так и из других регионов России. При этом многие из них останавливаются на «диких» пляжах, где своевременный вывоз мусора и отходов жизнедеятельности не производится. Кроме того, на побережье функционируют нефтеперерабатывающий завод и угольные порты, которые также могут оказывать влияние на водную среду и её обитателей. Помимо этого, Японское море является транспортной артерией и районом промыслового рыболовства, что может быть причиной его загрязнения бифенилами.

Сравнение выявленных нами средних концентраций ХОП с данными для других районов Мирового океана показало, что уровни ДДТ в рыбах из всех наших районов значительно ниже, чем в Атлантическом океане, Балтийском и Желтом морях [14, 33, 49], но на порядок величин выше, чем в беринговоморской ихтиофауне [23] (табл. 6.21). Средние уровни α - и γ -ГХЦГ в рыбах сопоставимы во всех сравниваемых данных. Концентрации β -ГХЦГ в исследованиях, с которыми проводилось сравнение [14, 23], не указаны. В работе [49] уровень β -изомера был ниже предела обнаружения ($<0,002$ нг/г сырой массы), в исследовании [33] уровни токсиканта не указаны. Однако в изученных нами районах дальневосточных морей России β -ГХЦГ был доминирующим изомером в камбалах и превышал сумму концентраций ГХЦГ в мышцах камбал из Желтого моря [14].

Уровни содержания ПХБ в мышцах рыб из Охотского моря не превышали концентраций, обнаруженных в камбалах Атлантического океана и Балтийского моря [33, 49], но значительно превосходили таковые в обитателях Желтого и Берингова морей [14, 23]. Суммарный уровень ПХБ в рыбах из Татарского пролива находится между таковыми в Гданьской бухте и устье реки Висла (Балтийское море). В рыбах Японского моря максимальные уровни ПХБ значительно выше, чем в Балтийском, Беринговом, Желтом морях и Атлантическом океане. Столь высокая разница средних концентраций в рыбах из разных районов обитания говорит о серьезном антропогенном прессе на экосистему б. Рифовая и всего япономорского района в целом.

В ходе статистической обработки найденные концентрации поллютантов в рыбах сравнивались как внутри районов, так и между собой с использованием двустороннего критерия Краскала-Уоллиса (рис. 6.33).

Рис. 6.32. Концентрации тяжелых конгенов ПХБ, Σ ПХБ_{инд} и Σ ПХБ в камбалах из обследованных районов, нг/г липидов

Таблица 6.21

**Средние концентрации ХОП и ПХБ в мышцах камбал
из различных районов Мирового океана, нг/г липидов**

Вид	Район исследо- вания	Σ ДДТ	ГХЦГ			Σ ПХБ	Источник
			α -	β -	γ -		
Речная камбала (<i>Platichthys flesus</i>)	Балтийское море	579	1,3	– ¹	0,8	258,5	[33]
	Балтийское море	732,2	1,4	–	0,73	373,2	[49]
	Северная часть Атлантики	140,9	2,3	–	1,8	518,2	
Звездчатая камбала (<i>Platichthys stellatus</i>)	Баренцево море	4,5	0			15,1	[23]
Рогатая камбала (<i>Pleuronichthys cornutus</i>)	Желтое море	122	13 ²			7,5	[14]
Палтусовидная камбала (<i>Hippoglossoides robustus</i>)	Охотское море	39,8	5,8	45,4	–	111,6	Эта работа
	Татарский пролив	–	–	221,3	–	347,5	
	Японское море	40,0	2,0	59,2	2,2	1615,7	

¹ Не обнаружено или не исследовалось;

² Сумма всех изомеров ГХЦГ

Все «тяжелые» конгенеры ПХБ показали достоверные различия концентраций в рыбах во всех районах исследования при $p \leq 0,05$, что говорит о разных источниках загрязнения и различной величине антропогенного пресса в каждом из них. Концентрации α - и β -изомеров ГХЦГ в рыбах достоверно различаются в каждом из районов. В то же время для уровней содержания ДДТ и его метаболитов в рыбах достоверных различий по районам не выявлено.

Корреляционный анализ (табл. 6.22–6.24) между всеми поллютантами в камбалах показал, что ряд конгенов ПХБ имеет сильные отрицательные связи с ХОП, что говорит о возможном превращении одних соединений в другие. Известно, например, что ДДТ и его метаболиты могут трансформироваться в ПХБ в верхних слоях атмосферы (воздействие ультрафиолета) и в морской воде (воздействие ультрафиолета и микроорганизмов) [5]. Положительные корреляции, обнаруженные между ГХЦГ и ДДТ и различными конгенерами ПХБ друг с другом, свидетельствуют о единых источниках поступления и совместном попадании в окружающую среду. Наблюдающаяся в некоторых случаях сильная положительная корреляция между

ГХЦГ и ПХБ, ДДТ и ПХБ также может указывать на единые источники поступления, например – атмосферный перенос [14, 38, 48].

Рис. 6.33. Суммарные концентрации СОЗ в камбалах из разных районов, нг/г липидов

Некоторые исследователи сообщали о сильной корреляции между p,p' -ДДЕ и ПХБ 153 в тканях ракообразных, камбал и тресковых, предполагая, что эти поллютанты имеют единый источник поступления и указывают на фон загрязнения в районе наблюдений [48]. Другие авторы считают, что положительная корреляция может говорить не только о едином источнике поступления, но и о сходных путях биоаккумуляции и биомагнификации [14, 38]. Установленная нами корреляция, скорее всего, говорит о едином источнике загрязнения. Несмотря на то, что ДДТ и ПХБ используются в разных отраслях экономики и попадают в экосистемы из разных источников, их положительная связь может свидетельствовать об их существенном и совместном поступлении из свалок ТБО.

Таблица 6.22

Корреляция Спирмена между индивидуальными СОЗ в камбалах из Охотского моря

ГХЦГ		ДДД		ДДЕ		ПХБ							
α-	β-	о,р'-	р,р'-	о,р'-	р,р'-	28	52	155	101	118	153	138	180
α-ГХЦГ	1,000												
β-ГХЦГ	0,700	1,000											
о,р'-ДДД	0,500	1,000											
р,р'-ДДД	-1,000**	0,371	1,000										
о,р'-ДДЕ	0,500			1,000									
р,р'-ДДЕ	0,000	-1,000**	1,000**		1,000								
ПХБ 28	-0,600	0,100	0,400	1,000**	0,200	1,000							
ПХБ 52	-1,000**	-0,500	1,000**		1,000**	1,000**	1,000						
ПХБ 155		1,000**						1,000					
ПХБ 101	-0,429	-0,524	-0,314	-1,000**	-0,400	0,357	-0,500	1,000**	1,000				
ПХБ 118	0,200	-0,214	-0,500	-1,000**	1,000**	-1,000**		1,000**	0,452	1,000			
ПХБ 153	-0,500	-0,200	-0,143	0,600	0,500	0,400	-1,000**	-1,000**	0,618*	-0,300	1,000		
ПХБ 138	0,800	-0,400	0,500		0,500	-0,500	-1,000**		0,371	1,000**	1,000**	1,000	
ПХБ 180	1,000**	-1,000**	1,000**			0,500	0,500		-1,000**	1,000**		0,500	1,000

* Корреляция значима при $p \leq 0,05$; ** Корреляция значима при $p \leq 0,01$

Таблица 6.23

Корреляция Спирмена между индивидуальными СОЗ в камбалах из Татарского пролива

β-ГХЦГ	p,p'-ДДЕ	ПХБ											
		28	52	155	101	118	143	153	138	180			
β-ГХЦГ	1,000												
p,p'-ДДЕ	1,000**												
ПХБ 28	0,829*	1,000											
ПХБ 52	0,700*	-1,000**	1,000										
ПХБ 155	0,600		0,600	1,000									
ПХБ 101	0,445	-1,000**	0,679	0,368	0,286	1,000							
ПХБ 118	0,042	1,000**	0,257	-0,176	-0,200	0,424	1,000						
ПХБ 143	-0,500		1,000**	0,600	-1,000**	0,400	0,800	1,000					
ПХБ 153	0,755**	1,000**	0,657	0,627*	-0,214	0,582*	0,720**	0,600	1,000				
ПХБ 138	0,261	1,000**	0,657	0,285	-0,214	0,427	0,918**	0,800	0,790**	1,000			
ПХБ 180	0,000		-0,500	0,900*	1,000**	0,700	0,500	1,000**	0,500	0,500	1,000		

* Корреляция значима при $p \leq 0,05$; ** Корреляция значима при $p \leq 0,01$

Таблица 6.24

Корреляция Спирмена между индивидуальными СОЗ в камбалах из Японского моря

ГХЦГ	ДДД			ДДЕ			ПХБ			101	118	143	153	138	180
	β-	γ-	α,р'-	р,р'-	α,р'-	р,р'-	р,р'-	28	52	155					
α-ГХЦГ	1,000														
β-ГХЦГ	0,143	1,000													
γ-ГХЦГ	0,200	0,500	1,000												
α,р'-ДДД	0,200	0,357	0,300	1,000											
р,р'-ДДД	0,600	-0,314	0,200	1,000											
α,р'-ДДЕ	0,476	0,300	-0,100	0,543	1,000										
р,р'-ДДЕ	0,900*	0,029	-0,200	0,200	0,543	1,000									
ПХБ 28	0,238	0,100	0,100	0,286	0,314	0,543	1,000								
ПХБ 52	0,190	-0,217	0,400	0,286	0,429	0,886*	0,667*	1,000							
ПХБ 155	-0,600	0,300	-0,500	-0,400	0,100	-0,600	0,500	-0,400	1,000						
ПХБ 101	0,381	0,200	-0,200	0,357	0,533	0,543	0,850**	0,467	0,500	1,000					
ПХБ 118	0,548	0,333	-0,200	0,179	0,083	0,714	0,300	0,050	0,300	0,717*	1,000				
ПХБ 143	-0,600	0,400	1,000**	0,600	0,400	-1,000**	0,800	0,200	1,000**	0,800	0,000	1,000			
ПХБ 153	0,643	-0,050	0,000	0,286	0,500	0,829*	0,767*	0,600	-0,100	0,900**	0,633	0,000	1,000		
ПХБ 138	0,643	-0,050	0,000	0,286	0,500	0,829*	0,767*	0,600	-0,100	0,900**	0,633	0,000	1,000**	1,000	
ПХБ 180	0,524	-0,133	0,000	0,286	0,633	0,829*	0,867**	0,733*	-0,100	0,833**	0,383	0,000	0,950**	0,950**	1,000

* Корреляция значима при $p \leq 0,05$; ** Корреляция значима при $p \leq 0,01$

6.3. Заключение

Аккумуляция стойких высокотоксичных соединений может оказывать влияние на здоровье взрослых особей, успешность их размножения, выживание потомства. Продолжение мониторинга биоаккумуляции СОЗ в лососевых непосредственно на нерестилищах даст новые сведения об этом малоизученном факторе, способном оказать влияние на общий запас и вылов ценной группы промысловых рыб. Ксенобиотики не должны иметь фоновых концентраций в окружающей среде, однако накопление СОЗ в органах рыб является отражением глобального фона токсикантов, сформировавшегося как на планете в целом, так и в Мировом океане, поэтому уровни содержания этих соединений в камбалах южной части Охотского моря (прикурильские воды), характеризующейся отсутствием прямых источников загрязнения и активной гидродинамикой, могут быть приняты как «фоновые». При этом, в органах и тканях камбал отражается локальное загрязнение, так как они ведут почти «оседлый» образ жизни.

6.4. Список литературы

1. Ворожбит, О.Ю. Рыбная промышленность Дальнего Востока России: современное состояние, проблемы и перспективы конкурентоспособности / О.Ю. Ворожбит, Т.Е. Даниловских, И.А. Кузьмичева [и др.]. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2016. – 156 с.
2. Доклад о состоянии окружающей среды в камчатском крае в 2018 году. – Петропавловск-Камчатский: Министерство природных ресурсов и экологии Камчатского края, 2019. – 395 с.
3. Зубцова, И.Л. Размещение отходов на территории Сахалинской области / И.Л. Зубцова // Вологдинские чтения. – 2008. – № 5. – С. 109–118.
4. Информационный отчет по объекту «Мониторинг Козельского полигона захоронения ядохимикатов и пестицидов». – Елизово: ООО «Недра», 2018. – 49 с.
5. Кросби, Д. Перенос и превращение пестицидов в атмосфере / Д. Кросби. // Миграция и превращения пестицидов в окружающей сре-

де: труды I Всесоюзного совещания. – М.: Гидрометеиздат, 1979. – С. 5–10.

6. Мамонтова, Е.А. Хлорорганические пестициды и полихлорированные бифенилы в тканях жилой формы нерки Толмачевского водохранилища, п-ов Камчатка / Е.А. Мамонтова, Е.В. Лепская, Е.Н. Тарасова [и др.]. // Биология внутренних вод. – 2018. – № 2. – С. 76–83.

7. Напазаков, В.В. Питание и пищевые отношения камбал в западной части Берингова моря в летне-осенний период / В.В. Напазаков, В.И. Чучукало // Известия ТИНРО. – 2002. – Т. 130. – С. 595–617.

8. О долгосрочной областной целевой программе «Отходы производства и потребления сахалинской области (2009–2015)»: [Постановление Администрации Сахалинской области: принят 22 сентября 2008 года N 293-па]. – Южно-Сахалинск, 2008.

9. Фадеев, Н.С. Справочник по биологии и промыслу рыб северной части Тихого океана / Н.С. Фадеев. – Владивосток: ТИНРО-центр, 2005. – 366 с.

10. Цыденова, О.В. Загрязнение бассейна озера Байкал: хлорорганические пестициды / О.В. Цыденова, В.Б. Батоев, Л. Вайсфлог, К.-Д. Венцель // Химия в интересах устойчивого развития. – 2003. – Т. 11. – С. 349–352.

11. Apeti, D.A. Assessment of contaminant body burdens and histopathology of fish and shellfish species frequently used for subsistence food by Alaskan Native communities / D.A. Apeti, S.I. Hartwell, S.M. Myers [et al.]. – North Pacific Research Board Final Report, 2013. – 63 p.

12. Arkoosh, M.R. Trends in organic pollutants and lipids in juvenile Snake River spring Chinook salmon with different outmigrating histories through the Lower Snake and Middle Columbia Rivers / M.R. Arkoosh, S. Strickland, A.V. Gaest [et al.] // Science of the Total Environment. – 2011. – V. 409. – P. 5086–5100.

13. Brett J.R. Energetics / In: Groot C., Margolis L., Clarke W.C. eds. Physiological ecology of Pacific salmon. – University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 1995. – P. 3–68.

14. Byun, G.-H. Biomagnification of persistent chlorinated and brominated contaminants in food web components of the Yellow Sea / G.-H. Byun, H.B. Moon, J.H. Choi // Marine Pollution Bulletin. – 2013. – V. 73. – P. 210–219.

15. Cullon, D.L. Persistent organic pollutants in chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*): implications for resident killer whales of British Co-

lumbia and Adjacent waters / D.L. Cullon, M.B. Yunker, C. Alleyne [et al.] // *Environmental Toxicology and Chemistry*. – 2009. – V. 28. – No. 1. – P. 148–161.

16. Debruyne, A. Magnification and toxicity of PCBs, PCDDs, and PCDFs in upriver-migrating Pacific Salmon / A. Debruyne, M. Ikononou, F. Gobas // *Environmental Science & Technology*. – 2004. – V. 38. – P. 6217–6224.

17. Donets, M.M. Organochlorine compounds in flounders of genus *Hippoglossoides* Gottsche, 1835 from the Far Eastern seas of Russia / M.M. Donets, V.Yu. Tsygankov, M.D. Boyarova [et al.] // *Marine Biological Journal*. – 2020. – V. 5. – No. 1. – P. 29–42.

18. Garner, A.J. Trends of polychlorinated dioxins, polychlorinated furans, and dioxin-like polychlorinated biphenyls in Chinook and Coho salmonid eggs from a Great Lakes tributary / A.J. Garner, J.J. Pagano // *Environmental Pollution*. – 2019. – V. 247. – P. 1039–1045.

19. Gerig, B.S. Environmental context and contaminant biotransport by Pacific salmon interact to mediate the bioaccumulation of contaminants by stream-resident fish / B.S. Gerig, D.T. Chaloner, D.J. Janetski [et al.] // *Journal of Applied Ecology*. – 2017. – V. 55. – P. 1846–1859.

20. Gerlach, B. Fish Monitoring Program / B. Gerlach. – Alaska Department of Environmental Conservation. Fish Tissue Testing Program, 2013.

21. Good, T.P. Persistent organic pollutants in forage fish prey of rhinoceros' auklets breeding in Puget Sound and the northern California Current / T.P. Good, S.F. Pearson, P. Hodum [et al.] // *Marine Pollution Bulletin*. – 2014. – V. 86. – P. 367–378.

22. Grung, M. Pesticide levels and environmental risk in aquatic environments in China — A review / M. Grung, Y. Lin, H. Zhang [et al.] // *Environment International*. – 2015. – V. 81. – P. 87–97.

23. Hartwell, S.I. Benthic habitat contaminant status and sediment toxicity in Bristol Bay, Alaska / S.I. Hartwell, A.D. Apeti, A.S. Pait, T. Radenbaugh, R. Britton // *Regional Studies in Marine Science*. – 2018. – V. 24. – P. 343–354.

24. Hendry, A. Secondary sexual characters, energy use, senescence, and the cost of reproduction in sockeye salmon / A. Hendry, O. Berg // *Canadian Journal of Zoology*. – 1999. – V. 77. – P. 1663–1675.

25. Hoekstra, P.F. Trophic transfer of persistent organochlorine contaminants (OCs) within an Arctic marine food web from the southern Beaufort–Chukchi Seas / P.F. Hoekstra, T.M. O'Hara, A.T. Fisk [et al.] // *Environmental Pollution*. – 2003. – V. 124. – P. 509–522.

26. Jackson, L. PCB congeners in Lake Michigan Coho (*Oncorhynchus kisutch*) and Chinook (*Oncorhynchus tshawytscha*) salmon / L. Jackson, S. Carpenter, J. Manchester-Neesving, C. Stow // *Environmental Science & Technology*. – 2001. – V. 35. – P. 856–862.

27. Jacobs, M.M. Investigation of selected persistent organic pollutants in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*), salmon aquaculture feed, and fish oil components of the feed / M.M. Jacobs, A. Covaci, P. Schepens // *Environmental Science and Technology*. – 2002. – V. 36. – P. 2797–2805.

28. Johnson, L. Persistent Organic Pollutants in Juvenile Chinook Salmon in the Columbia River Basin: Implications for Stock Recovery / L. Johnson, B. Anulacion, M. Arkoosh // *Transactions of the American Fisheries Society*. – 2013. – V. 142. – P. 21–40.

29. Kelly, B.C. Mercury and other trace elements in farmed and wild salmon from British Columbia, Canada / B.C. Kelly, M.G. Ikononov, D.A. Higgs, J. Oakes, C. Dubetz // *Environmental Toxicology and Chemistry*. – 2008. – V. 27. – P. 1361–1370.

30. Kelly, B.C. Persistent organic pollutants in aquafeed and Pacific salmon smolts from fish hatcheries in British Columbia, Canada / B.C. Kelly, M.P. Fernandez, M.G. Ikononou, W. Knapp // *Aquaculture*. – 2008 – V. 285. – P. 224–233.

31. Kelly, B.C. Tissue residue concentrations of organohalogens and trace elements in adult Pacific salmon returning to the Fraser River, British Columbia, Canada / B.C. Kelly, M.G. Ikononou, N. MacPherson [et al.] // *Environmental Toxicology and Chemistry*. – 2010. – V. 30. – P. 367–376.

32. Khristoforova N.K., Tsygankov V.Yu., Boyarova M.D., Lukyanova O.N. Concentrations of Trace Elements in Pacific and Atlantic Salmon // *Oceanology*. – 2015. – V. 55. – №5. – P. 679–685.

33. Kopko, O. Variability of biological indices, biomarkers, and organochlorine contaminants in flounder (*Platichthys flesus*) in the Gulf of Gdańsk, southern Baltic Sea / O. Kopko, H. Dabrowska // *Chemosphere*. – 2018. – V. 194. – P. 701–713.

34. Lukyanova, O.N. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in the Bering flounder (*Hippoglossoides robustus*) from the Sea of Okhotsk / O.N. Lukyanova, V.Yu. Tsygankov, M.D. Boyarova // *Marine Pollution Bulletin*. – 2018. – V. 137. – P. 152–156.

35. Malde, M.K. Calcium from salmon and cod bone is well absorbed in young healthy men: a double-blinded randomized crossover design /

M.K. Malde, S. Bügel, M. Kristensen [et al.] // Nutrition & Metabolism. – 2010. – V. 7. – No. 61. – 9 p.

36. Matsumoto, R. Polychlorinated biphenyl (PCB) concentrations and congener composition in masu salmon from Japan: A study of all 209 PCB congeners by high-resolution gas chromatography/high-resolution mass spectrometry (HRGC/HRMS) / R. Matsumoto, N.P. Cam Tu, S. Haruta, M. Kawano, I. Takeuchi // Marine Pollution Bulletin. – 2014. – V. 85 – P. 549–557.

37. Montory, M. PCBs and PBDEs in wild Chinook salmon (*Oncirhynchus tshawytscha*) in the Northern Patagonia, Chile / M. Montory, E. Habit, P. Fernandez, J.O. Grimalt, R. Barra // Chemosphere. – 2010. – V. 78. – P. 1193–1199.

38. Moon, H.-B. Human health risk of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides resulting from seafood consumption in South Korea, 2005–2007 / H.-B. Moon, H.S. Kim, M. Choi, J. Yu, H.G. Choi. // Food and Chemical Toxicology. – 2009. – V. 47. – P. 1819–1825.

39. O'Toole, S. Release of persistent organic contaminants from carcasses of Lake Ontario Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) / S. O'Toole, C. Metcalfe, I. Craine, M. Gross // Environmental Pollution. – 2006. – V. 140. – P. 102–113.

40. Oka, M. Concentrations of Persistent Organic Pollutants in Masu Salmon, *Oncorhynchus masou* / M. Oka, T. Arai, Y. Shibata, N. Miyazaki // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. – 2009. – V. 83. – P. 393–397.

41. Rice, S. Assessing the potential for remote delivery of persistent organic pollutants to the Kenai River in Alaska / S. Rice, A. Moles // Alaska Fishery Research Bulletin. – 2006. – V. 12. – P. 153–157.

42. Rios, L. M. Quantitation of persistent organic pollutants adsorbed on plastic debris from the Northern Pacific Gyre's "eastern garbage patch" / L.M. Rios, Jones P.R., C. Moore [et al.] // Journal of Environmental Monitoring. – 2010. – V. 12. – P. 2189–2312.

43. Susan, D.S. PCBs, PCDD/Fs, and Organochlorine Pesticides in Farmed Atlantic Salmon from Maine, Eastern Canada, and Norway, and Wild Salmon from Alaska / D.S. Susan, D. Brenner, M.L. Berger [et al.] // Environmental Science & Technology. – 2006. – V. 40. – P. 5347–5354.

44. Tripathi, V. Restoring HCHs polluted land as one of the priority activities during the UN-International Decade on Ecosystem Restoration (2021–

2030): A call for global action / V. Tripathi, S.A. Edrisi, R. Chaurasia [et al.] // *Science of The Total Environment*. – 2019. – V. 689. – P. 1304–1315.

45. Tsygankov, V.Yu. Bioindicators of organochlorine pesticides (OCPs) in the Sea of Okhotsk and the western Bering Sea / V.Yu. Tsygankov, M.D. Boyarova, O.N. Lukyanova, N.K. Khristoforova // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2017. – V. 73. – P. 176–184.

46. Tsygankov, V.Yu. Organochlorine pesticides in marine ecosystems of the Far Eastern Seas of Russia (2000–2017) / V.Yu. Tsygankov // *Water Research*. – 2019. V. 161. – P.43–53.

47. Visha, A. A Bayesian assessment of polychlorinated biphenyl contamination of fish communities in the Laurentian Great Lakes / A. Visha, N. Gamdhi, S.P. Bhasvar, G.B. Arhonditsis // *Chemosphere*. – 2018. – V. 210. – P. 1193–1206.

48. Voorspoels, S. Levels and profiles of PCBs and OCPs in marine benthic species from the Belgian North Sea and the Western Scheldt Estuary / S. Voorspoels, A. Covaci, J. Maervoet, I. De Meester, P. Schepens // *Marine Pollution Bulletin*. – 2004. – V. 49. – P. 393–404.

49. Waszak, I. Comparison of common persistent organic pollutants (POPs) in flounder (*Platichthys flesus*) from the Vistula (Poland) and Douro (Portugal) River estuaries / I. Waszak, H. Dabrowska, K. Komar-Szymczak // *Marine Pollution Bulletin*. – 2014. – V. 81. – P. 225–233.