

ЭКОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 574.64 + 613.2.099
doi: 10.17223/19988591/72/12

Стойкие органические загрязнители и программа Mussel Watch в акваториях Японского моря (залив Петра Великого)

Александра Дмитриевна Боровкова^{1,2},
Виктория Александровна Гаврилова³,
Максим Михайлович Донец⁴, Максим Андреевич Беланов⁵,
Василий Юрьевич Цыганков⁶

^{1, 2, 4, 5, 6} Тихоокеанский институт географии Дальневосточное отделение
Российской академии наук, Владивосток, Россия

^{1, 2, 3} Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

^{1, 2} <https://orcid.org/0009-0007-3285-822X>, borovkovasdm@yandex.ru

³ <https://orcid.org/0009-0004-7642-2936>, jones.vika@mail.ru

⁴ <https://orcid.org/0000-0002-2108-4448>, maksim.donecz@mail.ru

⁵ <https://orcid.org/0000-0003-0974-9176>, belanov.ma@gmail.com

⁶ <https://orcid.org/0000-0002-5095-7260>, tsig_90@mail.ru

Аннотация. Стойкие органические загрязняющие вещества (СОЗ) являются одним из наиболее опасных классов органических ксенобиотиков. СОЗ характеризуются биоаккумуляцией и биомагнификацией, обладают сильными токсичными свойствами и способны мигрировать на большие расстояния от источника поступления за счет явления трансграничного переноса поллютантов. Целью исследования является определение уровней СОЗ в мягких тканях моллюсков семейства Mytilidae (*Crenomytilus grayanus*, *Modiolus kurilensis*, *Mytilus trossulus*, *Mytilus galloprovincialis*), оценка временных трендов накопления токсикантов в акватории зал. Петра Великого и сравнение полученных данных с результатами работ стран Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР). Результаты показали присутствие СОЗ во всех пробах моллюсков в пределах от 0,6 до 12 955,1 нг/г липидов. В основном качественный состав хлорорганических пестицидов (ХОП) на всех станциях представлен продуктами деградации исходных соединений (β -ГХЦГ, ДДЕ, ДДД), только в некоторых частях Амурского залива преобладали формы, указывающие на недавнее загрязнение (γ -ГХЦГ, *p,p'*-ДДТ, *o,p'*-ДДТ). Полихлорированные бифенилы (ПХБ) найдены во всех исследованных пробах. Преобладали высокохлорированные конгенеры (118 ПХБ, 153 ПХБ, 138 ПХБ). Анализ временных трендов показал постепенное сокращение концентраций СОЗ в прибрежной зоне зал. Петра Великого. При сравнении полученных нами данных и результатов исследований стран АТР выявлено сравнительно низкое содержание ДДТ и ПХБ в Японском море, однако относительно высокое загрязнение акваторий ГХЦГ.

Ключевые слова: хлорорганические пестициды, полихлорированные бифенилы, двусторчатые моллюски, семейство Mytilidae, Японское море, залив Петра Великого, программа Mussel Watch

Источник финансирования: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (FZNS-2023-0011).

Благодарности: авторы благодарят к. б. н. Ольгу Владимировну Подгурскую (НИЦМБ ДВО РАН) за предоставление проб биологического материала.

Для цитирования: Боровкова А.Д., Гаврилова В.А., Донец М.М., Беланов М.А., Цыганков В.Ю. Стойкие органические загрязнители и программа Mussel Watch в акваториях Японского моря (залив Петра Великого) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 72. С. 304–321. doi: 10.17223/19988591/72/12

ECOLOGY

Original article

doi: 10.17223/19988591/72/12

Persistent organic pollutants and the Mussel Watch Program in the Sea of Japan (Peter the Great Bay)

**Aleksandra D. Borovkova^{1,2}, Viktoria A. Gavrilova³,
Maksim M. Donets⁴, Maksim A. Belanov⁵,
Vasiliy Yu. Tsygankov⁶**

^{1, 2, 4, 5, 6} *Pacific Geographical Institute, Far Eastern Branch,
Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

^{1, 2, 3} *Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation*

^{1, 2} <https://orcid.org/0009-0007-3285-822X>, borovkovasdm@yandex.ru

³ <https://orcid.org/0009-0004-7642-2936>, jones.vika@mail.ru

⁴ <https://orcid.org/0000-0002-2108-4448>, maksim.donetz@mail.ru

⁵ <https://orcid.org/0000-0003-0974-9176>, belanov.ma@gmail.com

⁶ <https://orcid.org/0000-0002-5095-7260>, tsig_90@mail.ru

Summary. Persistent organic pollutants (POPs) are among the most hazardous and under-investigated compounds. They are characterized by bioaccumulation, bio-magnification, high toxicity, and the ability to migrate through water and air masses far from the original pollution source. Despite the signing of the Stockholm Convention in 2001, some countries still retain the right to use DDT for sanitary and epidemiological control purposes. This study aims to estimate current levels of POPs in the soft tissues of Mytilidae bivalve mollusks (*Crenomytilus grayanus*, *Modiolus kurilensis*, *Mytilus trossulus*, and *Mytilus galloprovincialis*) and to analyze temporal trends in toxicant accumulation by comparing the current data with results from earlier studies, using the Sea of Japan and the Asia-Pacific region as case examples.

Samples of mollusk soft tissues were collected from various locations in Peter the Great Bay during the summers of 2017 and 2018 (See Fig. 1). Additional specimens from Amur Bay were collected during the summer-autumn period of 2022 (See Fig. 1). Concentrations of persistent organic pollutants (POPs), including organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs), were measured in the samples using gas chromatography with an electron capture detector (GC-ECD).

The results revealed the presence of persistent organic pollutants (POPs) in all samples analyzed, ranging from 0.6 to 12,955.1 ng/g lipid weight (lw). The highest concentrations of organochlorine pesticides (OCPs) were detected in mollusks from Amur Bay (See Fig. 2). Isomers of hexachlorocyclohexane (HCH) were predominant,

with β -HCH as the main form (447.02 ± 1612.00 ng/g lw), indicating long-term pollution. Among DDT and its metabolites, degradation products (DDE and DDD) were dominant. The major metabolite, *o,p'*-DDE, was found at concentrations ranging from 4.2 to 453.37 ng/g lw. However, almost all specimens also contained the original compounds (*o,p'*-DDT and *p,p'*-DDT), suggesting recent exposure to the toxicant. The lowest levels of OCPs were detected in samples from Cape Kozmina (20.12 ± 4.78 ng/g lw), which may be related to specific flow dyke issues in Nakhodka Bay (See Fig. 2). The highest concentrations of PCBs were found in Amur Bay (See Fig. 3). The primary congeners were highly chlorinated PCBs: 118 (70.53 ± 79.83 ng/g lw), 153 (62.94 ± 63.14 ng/g lw), and 138 (65.63 ± 97.37 ng/g lw), indicating a historical input of these toxicants. The lowest levels of PCBs were detected near Bolshoy Pelis Island, likely due to the absence of local pollution sources (See Fig. 3). Time trend analyses showed a gradual decrease in DDT and PCB concentrations; however, a slight increase in HCH isomer levels was observed (See Table 2). When comparing these data with published results from the Asia-Pacific region (APR), it was found that DDT and PCB concentrations in Russia were lower than those in most APR countries (See Table 3). However, the detected HCH concentrations exceeded those reported in nearly all countries in the region and were comparable to the levels observed in China (See Table 3).

The article contains 3 Figures, 3 Tables, 14 References.

Keywords: organochlorine pesticides, polychlorinated biphenyls, bivalves, family Mytilidae, the Sea of Japan, Peter the Great Bay, Mussel Watch Program

Fundings: this work was partially supported by RF Ministry of Science and Higher Education (FZNS-2023-0011).

Acknowledgments: the authors thank Olga V. Podgurskaya (Cand. Sci. (Biol.), NSCMB FEB RAS) for providing samples of biological material.

For citation: Borovkova AD, Gavrilova VA, Donets MM, Belanov MA, Tsyganov VYu. Persistent organic pollutants and the Mussel Watch program in the Sea of Japan (Peter the Great Bay). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;72:304-321. doi: 10.17223/19988591/72/12

Введение

За последние десятилетия загрязнение Мирового океана стало одной из наиболее актуальных экологических проблем. Стойкие органические загрязняющие вещества (СОЗ) считаются наиболее губительными для живых организмов среди ксенобиотиков. Они способны оказывать негативное воздействие на функционирование природных экосистем и здоровье людей [1]. Главное отличие СОЗ от постоянно присутствующих в природной среде поллютантов, проявляющих свою токсичность в случае превышения естественных концентраций, заключается в их происхождении – эти вещества являются ксенобиотиками. Поэтому живые организмы не имеют возможности адаптироваться к их присутствию в экосистемах. СОЗ проявляют канцерогенные, цитотоксические, тератогенные и генотоксические свойства, и, кроме того, негативно воздействуют на нервную и сердечно-сосудистую системы [1].

СОЗ включают такие вещества антропогенного происхождения, как дихлордифенилтрихлорэтан (ДДТ) и его метаболиты, изомеры гексахлорциклогексана (ГХЦГ), которые используются как инсектициды в сельском и лесном хозяйстве для борьбы с вредителями выращиваемых культур и в медицинских целях для борьбы с малярией, и полихлорированные бифенилы (ПХБ), относящиеся к побочным продуктам некоторых промышленных процессов [2].

Наиболее широкое применение получили ДДТ и ГХЦГ [1]. На сегодняшний день эти пестициды запрещены практически во всех странах мира. Несмотря на это, некоторые государства до сих пор сохраняют за собой право производить и использовать ДДТ, в результате чего загрязнению подвергаются и близлежащие к ним территории.

Программа International Mussel Watch является проектом, осуществляющим мониторинг качества вод прибрежных морских акваторий с использованием двустворчатых моллюсков-биоиндикаторов. В данную программу включились практически все страны Азиатско-Тихоокеанского региона (Китай, Япония, Индия, Корея, Вьетнам и др.) [3].

Хотя проблема загрязнения природных экосистем СОЗ является важной и международной, в России проведено недостаточно исследований, посвященных воздействию органических ксенобиотиков на окружающую среду. На сегодняшний день особое внимание привлекает исследование Дальневосточных морей России, в том числе Японского моря. Поскольку СОЗ характеризуются высокой токсичностью и стойкостью к природным факторам, важно регулярно проводить мониторинговые исследования содержания токсикантов в акватории и промысловых видах гидробионтов. Кроме того, акватория граничит с государствами, которые до сих пор сохраняют за собой право применять СОЗ в сельскохозяйственных и санитарно-эпидемиологических целях.

Таким образом, целью работы является оценка уровней СОЗ в мягких тканях двустворчатых моллюсков прибрежных акваторий зал. Петра Великого (Японское море) в рамках программы Mussel Watch, оценка накопления органических ксенобиотиков в моллюсках Японского моря в разные годы, проведение сравнительного анализа степени загрязнения морских акваторий с данными других стран АТР.

Материалы и методики исследования

Биологическим материалом для индикации загрязнения в настоящем исследовании служили мягкие ткани 228 особей четырех видов двустворчатых моллюсков семейства Mytilidae (*Crenomytilus grayanus*, *Mytilus trossulus*, *Modiolus kurilensis*, *Mytilus galloprovincialis*).

В 2017–2018 гг. собраны 96 особей трех видов (*Crenomytilus grayanus*, *Mytilus trossulus* и *Modiolus kurilensis*) в летний период в разных частях залива Петра Великого. В 2022 г. в летне-осенний период в Амурском заливе собраны 132 особи четырех видов (*Crenomytilus grayanus*, *Mytilus trossulus*, *Modiolus kurilensis*, *Mytilus galloprovincialis*) (рис. 1).

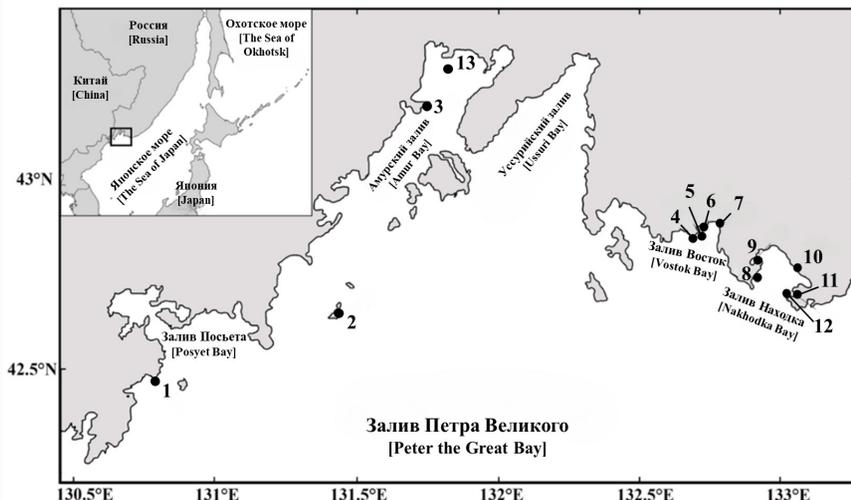


Рис. 1. Карта отбора проб в Японском море (зал. Петра Великого): 1 – о. Веры; 2 – о. Большой Пелис; 3 – м. Чихачева; 4 – бух. Стрельбище; 5 – м. Чайковского; 6 – бух. Средняя; 7 – бух. Литовка; 8 – бух. Мусатова; 9 – бух. Находка; 10 – м. Красный; 11 – бух. Козьмина; 12 – м. Козьмина, 13 – Амурский залив
[Fig. 1. Map of sampling (Peter the Great Bay, the Sea of Japan): 1 - Vera Island; 2 - Bolshoy Pelis Island; 3 - Cape Chikhacheva; 4 - Strelbishche Bay; 5 - Cape Tchaikovsky; 6 - Bay Srednyaya; 7 - Bay Litovka; 8 - Bay Musatova; 9 - Bay Nakhodka; 10 - Cape Krasny; 11 - Bay Kozmina; 12 - Cape Kozmina, 13 - Amur Bay]

В табл. 1 представлены данные места, года отбора, видовой принадлежности, количества особей и содержания липидов для исследованных моллюсков зал. Петра Великого 2017–2018 гг. и 2022 г.

Перед хроматографическим анализом СОЗ проводилась пробоподготовка: липиды экстрагировались смесью гексан : ацетон (1 : 1) с последующим разрушением соэкстрактивных компонентов концентрированной серной кислотой. Полученный экстракт разделяли на хроматографической колонке с сорбентом Florisill® 100–200 меш. Более подробное описание пробоподготовки опубликовано нами ранее [4].

Основное определение массового содержания хлорорганических соединений в биоматериале проводили на газовом хроматографе Shimadzu GC-2010 Plus gas с ECD, оснащенный автодозатором АОС-20i. Использовалась капиллярная колонка DB-5 со смесью гелия и азота в качестве газоносителя при постоянной скорости потока 1,0 мл/мин. Температуры в колонке, инжекторе и детекторе составляли 210, 250 и 280°C соответственно [4].

Для приготовления стандартных растворов ХОП и ПХБ использовались стандартные образцы (Dr. Ehrenstorfer и AccuStandard) α -ГХЦГ, β -ГХЦГ, γ -ГХЦГ, δ -ГХЦГ, *p,p'*-ДДТ, *p,p'*-ДДД, *p,p'*-ДДЕ, *o,p'*-ДДТ, *o,p'*-ДДД, *o,p'*-ДДЕ и смесь 28, 52, 155, 101, 118, 143, 153, 138, 180, 207 ПХБ конгенов с установленными метрологическими характеристиками – содержание основного вещества 99,4–99,6% с погрешностью определения 0,4%.

Таблица 1 [Table 1]

Данные места и года отбора, видовой принадлежности, количества особей и содержания липидов для исследованных моллюсков зал. Петра Великого
[Data on the location and year of sampling, species, number of individuals and lipid content for the studied mollusks of Peter the Great Bay]

Место отбора [Sampling location]	Год [Year]	Вид [Species]	N, экз. [N, ind.]	Липиды, % [Lipids, %]
о. Веры [Vera Island]	лето 2018 г. [summer 2018]	<i>Crenomytilus grayanus</i>	12	$\frac{0,11-0,59^1}{0,35 \pm 0,13^2}$
о. Большой Пелис [Bolshoy Pelis Island]	лето 2017 г. [summer 2017]	<i>Crenomytilus grayanus</i>	10	$\frac{0,005-0,015}{0,009 \pm 0,003}$
м. Чихачева [Cape Chikhacheva]	лето 2018 г. [summer 2018]	<i>Crenomytilus grayanus</i>	10	$\frac{0,03-3,16}{0,97 \pm 0,91}$
бух. Стрельбище [Strelbishche Bay]	лето 2017 г. [summer 2017]	<i>Modiolus kurilensis</i>	10	$\frac{0,004-0,50}{0,015 \pm 0,014}$
м. Чайковского [Cape Tchaikovsky]	лето 2018 г. [summer 2018]	<i>Crenomytilus grayanus</i>	5	$\frac{0,44-0,65}{0,52 \pm 0,09}$
бух. Средняя [Bay Srednyaya]	лето 2018 г. [summer 2018]	<i>Modiolus kurilensis</i>	6	$\frac{0,20-1,33}{0,66 \pm 0,38}$
бух. Литовка [Bay Litovka]	лето 2017 г. [summer 2017]	<i>Modiolus kurilensis</i>	10	$\frac{0,003-0,009}{0,005 \pm 0,002}$
бух. Мусатова [Bay Musatova]	лето 2018 г. [summer 2018]	<i>Modiolus kurilensis</i>	6	$\frac{0,13-0,91}{0,46 \pm 0,25}$
бух. Находка [Bay Nakhodka]	лето 2018 г. [summer 2018]	<i>Mytilus trossulus</i>	5	$\frac{0,29-0,41}{0,33 \pm 0,05}$
м. Красный [Cape Krasny]	лето 2018 г. [summer 2018]	<i>Modiolus kurilensis</i>	6	$\frac{0,32-0,91}{0,46 \pm 0,22}$
бух. Козьмина [Bay Kozmina]	лето 2018 г. [summer 2018]	<i>Crenomytilus grayanus</i>	6	$\frac{0,15-0,39}{0,26 \pm 0,10}$
м. Козьмина [Cape Kozmina]	лето 2018 г. [summer 2018]	<i>Mytilus trossulus</i>	10	$\frac{0,25-0,69}{0,27 \pm 0,16}$
Амурский залив [Amur Bay]	лето-осень 2022 г. [summer-autumn 2022]	<i>Crenomytilus grayanus</i>	19	$\frac{0,12-1,30}{0,55 \pm 0,27}$
		<i>Mytilus trossulus</i>	20	$\frac{0,15-2,36}{1,18 \pm 0,59}$
		<i>Modiolus kurilensis</i>	83	$\frac{0,11-3,13}{1,07 \pm 0,72}$
		<i>Mytilus galloprovincialis</i>	10	$\frac{1,26-2,23}{1,80 \pm 0,33}$

Примечание. ¹ Диапазон, min–max (числитель); ² среднее арифметическое ± стандартное отклонение (знаменатель).

[Note. ¹ Range, min-max (numerator); ² arithmetic mean ± standard deviation (denominator)].

Для хроматографии использовались рабочие стандартные растворы ХОП и ПХБ с концентрацией 20 нг/мл, приготовленные путем разбавления стандартных растворов соответствующим объемом *n*-гексана.

Статистический анализ результатов осуществлялся с помощью программного обеспечения IBM SPSS Statistics для ОС Windows 10. Достоверность данных оценивали с помощью двустороннего критерия Краскала–Уоллиса с уровнем значимости $p \leq 0,05$. Результаты представлены в виде: диапазон концентраций (min–max), среднее значение \pm стандартное отклонение. В связи с тем, что общепринятой формой выражения концентраций СОЗ является концентрация, приведённая на массу липидов, а также основываясь на их высокой липофильности, все результаты представлены в виде нг/г липидов.

Результаты исследования и обсуждение

СОЗ в мягких тканях моллюсков Японского моря. Результаты исследования мягких тканей моллюсков, собранных в 2017–2018 гг., показали присутствие хлорированных углеводородов (Σ ХОП + Σ ПХБ) во всех особях в диапазоне от 0,6 до 2769,7 нг/г липидов. Согласно полученным данным, наибольшие концентрации Σ СОЗ обнаружены в *Modiolus kurilensis*, отобранных с территории м. Красный. Наименее загрязненной органическими токсикантами акваторией являлась станция о. Большой Пелис, где уровни содержания Σ СОЗ варьировали от 1,1 до 253,1 нг/г липидов.

Концентрации Σ ХОП превышали таковые у Σ ПХБ ($119,94 \pm 571,40$ и $48,71 \pm 68,71$ нг/г липидов соответственно). Среди пестицидов преобладали ДДТ и его метаболиты. Наиболее определяемыми являлись продукты распада исходного соединения, характеризующие давнее поступление токсикантов в среду [1]. Основные метаболиты – *p,p'*-ДДЕ и *o,p'*-ДДЕ, доля которых составляла $> 52\%$ и $> 39\%$ соответственно.

Изомеры ГХЦГ присутствовали практически во всех образцах в пределах от 0,6 до 553,1 нг/г липидов. Преобладал β -изомер ($34,93 \pm 88,31$ нг/г липидов), являющийся наиболее устойчивой формой и свидетельствующий о длительном пребывании токсиканта в акватории [5]. Однако отношение сумм α - и γ -изомеров ($115,4$ и $160,1$ нг/г липидов соответственно) показало преобладание γ -формы, что может указывать на недавнее поступление токсикантов.

ПХБ обнаружены во всех пробах в пределах от 0,6 до 610 нг/г липидов. Преобладали низкохлорированные 28 и 52 ПХБ, обнаруженные во всех образцах мягких тканей моллюсков. Среди более устойчивых высокохлорированных конгенов преобладал 138 ПХБ – от 3,7 до 52,1 нг/г липидов.

В Амурском заливе в 2022 г. СОЗ обнаружены во всех особях двусторчатых моллюсков в пределах от 0,6 до 12955,1 нг/г липидов. Пестициды преобладали над ПХБ и составили $> 76\%$ от общего количества токсикантов. Преобладали изомеры ГХЦГ, среди которых наиболее определяемым был β -изомер ($447,02 \pm 1612,00$ нг/г липидов), характеризующий длительное пребывание ксенобиотиков в акватории. Остальные изомеры

зафиксированы в ряду: δ -ГХЦГ ($210,96 \pm 798,79$ нг/г липидов), γ -ГХЦГ ($126,08 \pm 291,56$ нг/г липидов), α -ГХЦГ ($30,99 \pm 24,26$ нг/г липидов). Показатель α/γ свидетельствовал о доминировании γ -ГХЦГ, что может указывать на недавнее поступление пестицида в среду.

ДДТ в основном представлен продуктами распада исходного соединения – метаболитами ДДЕ и ДДД, доля которых составила $> 65\%$. Преобладал *o,p'*-ДДЕ, обнаруженный в пределах от 4,2 до 453,37 нг/г липидов. Однако практически во всех пробах найдены «свежие формы» *o,p'*-ДДТ и *p,p'*-ДДТ. Тем не менее соотношение исходного коммерческого препарата к сумме всех основных продуктов его трансформации составляло 0,49, что также указывает на относительно давнее поступление токсикатов в среду.

В некоторых особях зафиксировано присутствие альдрина ($63,37 \pm 55,90$ нг/г липидов), также свидетельствующего о свежем загрязнении акватории.

ПХБ обнаружены во всех пробах моллюсков в пределах от 2,38 до 1081,61 нг/г липидов. Доминировали высокохлорированные 118 ПХБ ($70,53 \pm 79,83$ нг/г липидов), 153 ПХБ ($62,94 \pm 63,14$ нг/г липидов) и 138 ПХБ ($65,63 \pm 97,37$ нг/г липидов), указывающие на длительное пребывание токсикантов в акватории.

Сравнительный анализ уровней накопления ксенобиотиков мягкими тканям моллюсков в исследованных районах показал значимые различия между станциями для Σ ДДТ, Σ ГХЦГ и Σ ПХБ ($p \leq 0.05$).

Наиболее высокие уровни Σ ХОП определены в Амурском заливе (рис. 2). В акваторию впадает несколько рек, крупнейшей из которых является р. Раздольная, протекающая вдоль сельскохозяйственных районов Приморского края. Кроме того, на северо-западе в залив впадает р. Барабашевка, берущая начало на западных склонах сопки Синий Утес, долина реки расположена в горном районе Черные горы, располагающемся между Россией и КНР. Таким образом, полученные результаты могут быть обусловлены воздействием на залив речного стока, несущего загрязняющие вещества с полей, где ранее применялись пестициды, и явлением трансграничного переноса поллютантов из регионов, где продолжают использовать хлорорганические инсектициды. Кроме того, в заливе ведется активное судоходство. Используемое покрытие судов для борьбы с организмами-обрастателями также может содержать хлорированные углеводороды, что, возможно, объясняет присутствие в небольших концентрациях форм, указывающих на недавнее поступление ксенобиотиков в акваторию [6].

Среди исследованных станций высокие концентрации Σ ХОП также обнаружены в мягких тканях моллюсков, собранных на территории м. Красный (рис. 2). В числе пестицидов превалировала группа ДДТ. Преобладающий метаболит – *p,p'*-ДДЕ, обнаруженный в диапазоне концентраций от 703,94 до 2769,7 нг/г липидов. Кроме того, на территории мыса определены высокие в сравнении с другими станциями (бух. Литовка, бух. Стрельбище, о. Большой Пелис, бух. Находка, м. Веры, м. Козьмина, бух. Козьмина, м. Чайковского, бух. Средняя) уровни изомеров ГХЦГ.

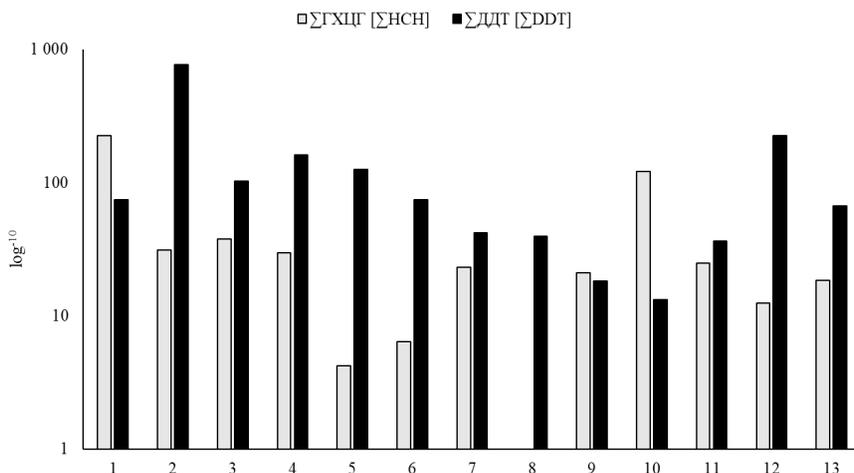


Рис. 2. Уровни ΣХОП (ΣГХЦГ и ΣДДТ) в исследованных районах: 1 – Амурский залив, 2 – м. Красный, 3 – бух. Мусатова, 4 – бух. Литовка, 5 – бух. Стрельбище, 6 – о. Большой Пелис, 7 – бух. Находка, 8 – о. Веры, 9 – м. Козьмина, 10 – м. Чихачева, 11 – бух. Козьмина, 12 – м. Чайковского, 13 – бух. Средняя
[Fig. 2. ΣОСР (ΣHCH and ΣDDT) levels in the studied areas: 1 - Amur Bay, 2 - Cape Krasny, 3 - Bay Musatova, 4 - Bay Litovka, 5 - Strelbishche Bay, 6 - Bolshoy Pelis Island, 7 - Bay Nakhodka, 8 - Vera Island, 9 - Cape Kozmina, 10 - Cape Chikhacheva, 11 - Bay Kozmina, 12 - Cape Tchaikovsky, 13 - Bay Srednyaya]

Преобладала β-форма ($37,85 \pm 17,36$ нг/г липидов), характеризующая длительное пребывание поллютанта в среде. Такие результаты могут быть связаны с тем, что в зал. Находка недалеко от места отбора моллюсков впадает река Партизанская, протекающая вдоль полей Приморского края, где во второй половине XX века использовались пестициды для обработки сельскохозяйственных культур. Таким образом, присутствие в мягких тканях моллюсков форм, характеризующих давнее поступление поллютантов в акваторию, может быть обусловлено явлением переноса токсикантов речным стоком.

Наиболее низкие уровни ΣХОП зафиксированы на территории м. Козьмина ($20,12 \pm 4,78$ нг/г липидов) (см. рис. 2). В исследованных образцах обнаружены продукты распада исходных токсикантов β-ГХЦГ и *o,p'*-ДДЕ, свидетельствующие о длительном пребывании пестицидов в акватории. В одной особи определен дильдрин в количестве 22,3 нг/г липидов. Низкие концентрации ХОП сравнительно с другими исследованными районами, скорее всего, обусловлены гидродинамическими особенностями зал. Находка, способствующими выносу органических ксенобиотиков с территории м. Козьмина.

Высокие уровни ΣПХБ зафиксированы в Амурском заливе (рис. 3). На побережье акватории располагается большое количество населенных пунктов, крупнейшим из которых является г. Владивосток, в результате чего на залив оказывается высокая антропогенная нагрузка.

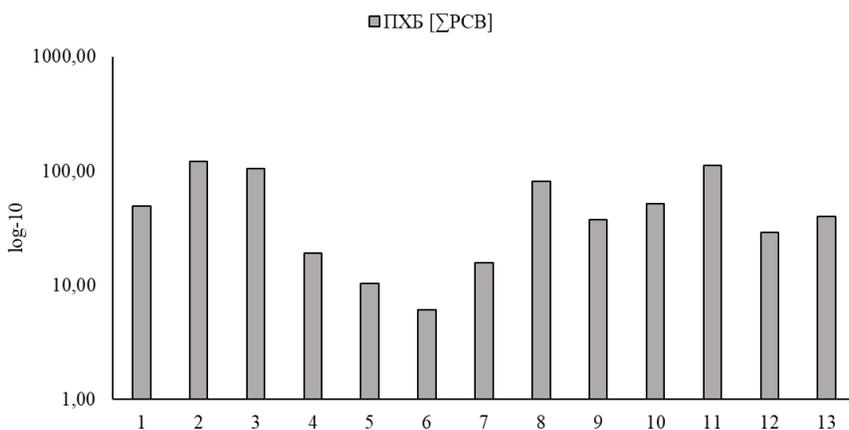


Рис. 3. Уровни ΣПХБ в исследованных районах: районах: 1 – Амурский залив, 2 – м. Красный, 3 – бух. Мусатова, 4 – бух. Литовка, 5 – бух. Стрельбище, 6 – о. Большой Пелис, 7 – бух. Находка, 8 – о. Веры, 9 – м. Козьмина, 10 – м. Чихачева, 11 – бух. Козьмина, 12 – м. Чайковского, 13 – бух. Средняя
[Fig. 3. ΣPCB levels in the studied areas: 1 - Amur Bay, 2 - Cape Krasny, 3 - Bay Musatova, 4 - Bay Litovka, 5 - Strelbishche Bay, 6 - Bolshoy Pelis Island, 7 - Bay Nakhodka, 8 - Vera Island, 9 - Cape Kozmina, 10 - Cape Chikhacheva, 11 - Bay Kozmina, 12 - Cape Tchaikovsky, 13 - Bay Srednyaya]

Акватория подвержена прессу, связанному с работой предприятий, обеспечивающих функционирование Владивостокского торгового порта, с активным судоходством и воздействием автомобильного и железнодорожного транспорта. Одними из основных источников поступления ПХБ в среду являются судоходство и обслуживание в бухтах морского транспорта. Таким образом, высокие уровни ΣПХБ, обнаруженные на территории Амурского залива, могут быть обусловлены техногенным воздействием, приуроченным к расположению акваторий близ промышленной зоны города. Кроме того, большое количество коммунально-бытовых стоков Владивостока попадает в Амурский залив. Несмотря на то, что они проходят предварительную очистку, многие загрязняющие вещества остаются в составе стоков, что также может оказывать значительное влияние на поступление органических токсикантов в акваторию.

Высокие уровни ΣПХБ обнаружены на территории бух. Козьмина (от 68,0 до 151,2 нг/г липидов). Во всех особях найден 28 ПХБ, являющийся низкохлорированным и свидетельствующий о недавнем поступлении токсикантов в бухту. Источником загрязнения акватории ПХБ может служить нефтеналивной терминал, функционирующий на территории бухты с 2009 г. Кроме того, ранее бух. Козьмина использовалась как аэродром для гидросамолетов, а в 90-х гг. – как пункт разбора морских судов, что также обуславливает сравнительно высокие концентрации поллютантов среди исследованных станций.

Наименьшие концентрации ΣПХБ отмечаются на территории о. Большой Пелис ($6,12 \pm 2,27$ нг/г липидов). Акватория располагается в пределах

Дальневосточного морского биосферного заповедника, в отдалении от основных объектов деятельности человека. Таким образом, вблизи острова отсутствуют источники поступления ксенобиотиков в среду, что обуславливает низкие уровни токсикантов в мягких тканях моллюсков.

Накопление СОЗ мягкими тканями двустворчатых моллюсков Японского моря в разные годы. В зал. Петра Великого анализ содержания хлорорганических пестицидов в мягких тканях двустворчатых моллюсков проводился до 2002 г. (табл. 2). Исследование акватории Амурского залива в 1996 г. [7] показало, что ДДТ и его метаболиты присутствовали во всех особях мидии Грея. Во всех пробах также обнаружены изомеры ГХЦГ. Результаты исследования зал. Посыет за 2002 г. [5] свидетельствуют о том, что в мягких тканях *Crenomytilus grayanus* и *Mizuhopecten yessoensis* найдены все изомеры ГХЦГ, среди которых наиболее определяемым являлся β-изомер. ДДТ и его метаболиты обнаружены только в особях *Crenomytilus grayanus*, основной метаболит – ДДД. В связи с тем, что результаты работы за 2002 г. представлены как нг/г сырой массы, данные пересчитаны на нг/г липидов (табл. 2).

Полихлорированные бифенилы в мягких тканях двустворчатых моллюсков в зал. Петра Великого исследованы в 1996 г. [7]. Результаты показали присутствие ПХБ во всех особях *Crenomytilus grayanus* от 2700 до 3700 нг/г липидов (табл. 2).

Таблица 2 [Table 2]

**Данные региональных исследований содержания СОЗ (нг/г липидов)
в мягких тканях двустворчатых моллюсков**
[Data from regional studies of POPs content (ng/g lipid) in soft tissues of bivalve mollusks]

Вид [Species]	Район [Area]	Год [Year]	ΣГХЦГ [ΣHCH]	ΣДДТ [ΣDDT]	ΣПХБ [ΣPCB]	Источник [References]
<i>Crenomytilus grayanus</i>	Амурский залив [Amur Bay]	1996	45	630	3200	[7]
<i>Mezohopecten yessoensis</i>	зал. Посыета [Posyet Bay]	2002	143,1 332,5	375,5 –	– ¹ –	[5]
<i>Crenomytilus grayanus</i>	зал. Петра Великого [Peter the Great Bay]	2017–2018	24,97	64,32	49,38	[8]
<i>Modiolus modiolus</i>			21,04	221,32	40,52	
<i>Mytilus trossulus</i>			22,28	32,42	30,73	
<i>Crenomytilus grayanus</i>	Амурский залив [Amur Bay]	2022	75,87	54,61	33,92	Эта работа [This study]
<i>Modiolus kurilensis</i>			250,23	74,09	47,29	
<i>Mytilus trossulus</i>			327,68	105,28	89,03	
<i>Mytilus gallo-provincialis</i>			130,57	41,71	23,55	

Примечание. ¹ Нет данных.
[Note. ¹ No data].

Результаты исследования уровней СОЗ в мягких тканях трех видов двустворчатых моллюсков семейства Mytilidae (*Crenomytilus grayanus*, *Modiolus modiolus*, *Mytilus trossulus*), отобранных в разных частях зал. Петра Великого летом 2017–2018 гг. [8], показало присутствие органических ксенобиотиков во всех образцах. Концентрации ХОП превышали таковые ПХБ. Среди пестицидов на всех станциях преобладал ДДТ и его метаболиты. Основной метаболит – ДДЕ. Изомеры ГХЦГ присутствовали практически во всех пробах, среди которых преобладал β-изомер. ПХБ обнаружены во всех пробах. Преобладали низкохлорированные 28 и 52 ПХБ, обнаруженные во всех особях моллюсков (табл. 2).

В целом анализ содержания пестицидов в акватории зал. Петра Великого с 1996 по 2022 г. демонстрирует снижение уровней концентраций токсикантов. Наблюдается тенденция к уменьшению концентраций ДДТ и ПХБ. Однако прослеживается небольшой рост уровней ГХЦГ в 2022 г. по сравнению с 2017 г. Так как данные всех исследований показали преобладание продуктов деградации исходных соединений (ДДЕ и ДДД, β-ГХЦГ) в мягких тканях моллюсков, можно сделать вывод, что увеличение концентраций ГХЦГ связано с тем, что на территории Дальнего Востока России в сельском хозяйстве преимущественно применялся линдан. Результаты свидетельствуют о постепенном сокращении поступления органических токсикантов в прибрежные экосистемы Японского моря как из локальных источников, так и посредством трансграничного переноса с территорий, где ХОП все еще продолжают использовать. До подписания рядом стран Стокгольмской конвенции в 2001 г. производство и использование хлорорганических пестицидов практически не ограничивалось, что может служить причиной обнаружения более высоких уровней содержания ДДТ в 1996 г. по сравнению с 2002, 2017 и 2022 г.

Полученные в 2022 г. данные свидетельствуют о снижении концентраций ПХБ. Тем не менее в работах 2017 и 2022 г. в значительных концентрациях обнаружены менее устойчивые низкохлорированные конгенеры, которые косвенно могут указывать на недавнее поступление поллютантов в акваторию [1]. Такие результаты могут быть связаны с невозможностью полного контроля поступления в среду и утилизации ПХБ, так как, согласно Стокгольмской конвенции, они относятся к категории непреднамеренно производимых соединений.

Mussel Watch в Азиатско-Тихоокеанском регионе (АТР). В рамках реализации мониторинга органических ксенобиотиков в морских экосистемах в 1990-е гг. прошлого столетия стартовала программа Asia-Pacific Mussel Watch (табл. 3).

В настоящее время такие государства, как Китай и Индия, сохраняют за собой право использовать ДДТ в санитарно-эпидемиологических и сельскохозяйственных целях, что обуславливает более высокие концентрации токсиканта на их территории. Однако для большинства регионов (Дальний Восток России, Корея, Япония, Таиланд) отмечается снижение уровней содержания пестицидов во всех компонентах окружающей среды [11, 13, 14].

Таблица 3 [Table 3]

**Результаты исследований содержания СОЗ в мягких тканях
двустворчатых моллюсков в странах АТР (нг/г липидов)
[Results of studies of POPs content in soft tissues of bivalve mollusks
in Asia Pacific countries (ng/g lw)]**

Вид [Species]	Район [Area]	Год [Year]	ΣГХЦГ [ΣHCH]	ΣДДТ [ΣDDT]	ΣПХБ [ΣPCB]	Источник [References]
<i>Perna viridis</i>	Индия [India]	1995	119	373,9	344,5	[9]
	Вьетнам [Vietnam]	1997	5,8	4400	160	[10]
	Индонезия [Indonesia]	1998	2,9	69,7	87,1	
	Камбоджа [Cambodia]		– ¹	23	35	
	Малайзия [Malaysia]		3,7	90	56	
	Филиппины [Philippines]		1,8	21	290	
	Гонконг [Hong Kong]	1999	18	7700	310	
	Сингапур [Singapore]		12	110	90	
<i>Mytilus edulis</i>	Южная Корея [South Korea]	2005	12,7	130,6	262,6	[11]
<i>Scapharca broughtonii</i>	Желтое море, Китай [Yellow Sea, China]	2007	4	48	8,9	[12]
<i>Panopea japonica</i>			40	108	7,9	
<i>Argopecten irradians</i>	Дельта реки Янцзы, Китай [Yangtze River Delta, China]	2010	261,1	2743,26	–	[13]
<i>Barbatia virescens</i>						
<i>Bullacta exarata</i>						
<i>Cyclina sinensis</i>						
<i>Mytilus coruscus</i>						
<i>Meretrix meretrix</i>						
<i>Ostrea cucullata</i>						
<i>Ruditapes philippin</i>						
<i>Sinonovacula constricta</i>						
<i>Scapharca subcrenata</i>						
<i>Tegillarca granosa</i>						

Вид [Species]	Район [Area]	Год [Year]	ΣГХЦГ [ΣHCH]	ΣДДТ [ΣDDT]	ΣПХБ [ΣPCB]	Источник [References]
<i>Saccostrea mordax</i>	Окинава, Япония [Okinawa, Japan]	2018	–	200	260	[14]
<i>Crenomytilus grayanus</i>	Амурский залив [Amur Bay]	2022	75,87	54,61	33,92	Эта работа [This study]
<i>Modiolus kurilensis</i>			250,23	74,09	47,29	
<i>Mytilus trossulus</i>			327,68	105,28	89,03	
<i>Mytilus gallo-provincialis</i>			130,57	41,71	23,55	

Примечание. ¹ Нет данных.
[Note. ¹ No data].

Уменьшение загрязненности прибрежных вод ХОП также отмечается в Китае за последние годы. Такие результаты можно объяснить отказом большинства стран от использования ХОП в сельском хозяйстве и медицине.

Высокие уровни ПХБ представлены в Японии, Гонконге, Южной Корее и Индии (табл. 3), что может быть связано с развитым промышленным комплексом стран и активным судоходством. На территории государств расположено несколько крупнейших портов мира (Гонконг, Пусан (Южная Корея), Йокогама (Япония)), что может объяснять загрязнение близлежащих прибрежных акваторий. Отмечается, что наибольшие концентрации ПХБ характерны для постиндустриальных стран, в отличие от индустриальных, где уровни загрязнения значительно ниже.

На территории России отмечаются значительно более низкие уровни загрязнения прибрежных акваторий зал. Петра Великого ПХБ и ДДТ по сравнению с большинством государств Азиатско-Тихоокеанского региона (см. табл. 3). Однако обнаруженные концентрации ГХЦГ превышали данные практически всех стран региона и были сопоставимы с показателями Китая (см. табл. 2). Такие результаты могут быть обусловлены тем, что в РФ для обработки сельскохозяйственных культур преимущественно использовался линдан и технический ГХЦГ. В целом на территории Российской Федерации обнаружены низкие концентрации СОЗ по сравнению с другими странами Азиатско-Тихоокеанского региона (см. табл. 3). Отсутствие крупных промышленных предприятий и запрет на использование СОЗ обуславливают низкие уровни загрязнения органическими ксенобиотиками морских вод района. Такие результаты позволяют предположить, что основной вклад в поступление свежих поллютантов в акваторию зал. Петра Великого вносит трансграничный перенос СОЗ.

Заключение

Таким образом, качественный и количественный состав СОЗ, обнаруженный в мягких тканях двустворчатых моллюсков зал. Петра Великого,

указывает на продолжающееся загрязнение прибрежных акваторий Японского моря стойкими органическими загрязняющими веществами. Данные показали преобладание форм ксенобиотиков, характеризующих давнее поступление токсикантов в среду. Однако продолжают фиксироваться метаболиты и изомеры, свидетельствующие о «свежем» загрязнении. Сравнительный анализ уровней содержания, распределения и возможных источников поступления СОЗ в акватории зал. Петра Великого показал присутствие в меньших концентрациях органических токсикантов по сравнению с близлежащими странами Азиатско-Тихоокеанского региона.

Внедрение мер по предотвращению загрязнения окружающей среды органическими ксенобиотиками в рамках Стокгольмской конвенции привели к значительному сокращению концентрации СОЗ в мягких тканях двустворчатых моллюсков зал. Петра Великого за последние годы. Тем не менее, в связи с тем, что хлорорганические токсиканты способны сохранять свои свойства и негативно воздействовать на окружающую среду и здоровье населения, необходимо продолжать мониторинговые исследования поступления и трансформации хлорированных углеводородов в прибрежных районах дальневосточных морей России.

Список источников

1. Tsygankov V. The *Dirty Dozen* of the Stockholm Convention and other persistent organic pollutants: A review // *Persistent Organic Pollutants in the Ecosystems of the North Pacific* / eds. V. Tsygankov. Cham : Springer, Earth and Environmental Sciences Library, 2023. PP. 1–48. doi: 10.1007/978-3-031-44896-6_1
2. El-Shahawi M.S., Hamzaa A., Bashammakh A.S., Al-Saggaf W.T. An overview on the accumulation, distribution, transformations, toxicity and analytical methods for the monitoring of persistent organic pollutants // *Talanta*. 2009. Vol. 80, № 5. PP. 1587–1597. doi: 10.1016/j.talanta.2009.09.055
3. Tanabe S. Asia-Pacific Mussel Watch progress report // *Marine Pollution Bulletin*. 2000. Vol. 40, № 8. 651. doi: 10.1016/S0025-326X(00)00019-9
4. Tsygankov V., Donets M.M., Gumovskaya Y.P., Lyagusha M.S., Gumovskiy A.N., Chernyaev A.P. Methods to determine persistent organic pollutants in various components of ecosystems in the Far Eastern Region // *Persistent Organic Pollutants in the Ecosystems of the North Pacific* / eds. V. Tsygankov. Cham : Springer, Earth and Environmental Sciences Library, 2023. PP. 49–56. doi: 10.1007/978-3-031-44896-6_2
5. Боярова М.Д. Хлорированные углеводороды в гидробионтах залива Посьета Японского моря // *Известия ТИНРО*. 2006. Т. 145. С. 271–278.
6. Lao Q., Liu G., Zhou X., Chen F., Zhang S. Sources of polychlorinated biphenyls (PCBs) and dichlorodiphenyltrichloroethanes (DDTs) found in surface sediment from coastal areas of Beibu Gulf: A reflection on shipping activities and coastal industries // *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 167. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112318
7. Tkalin A.V., Lyshavskaya T.S., Hills J.W. Organochlorine pesticides in mussels and bottom sediments from Peter the Great Bay near Vladivostok // *Ocean Research*. 1997. Vol. 19. PP. 115–119.
8. Borovkova A.D., Mironova E.K., Metreveli V.E., Tsygankov V. Implementation of the Mussel Watch Program by Russian scientists in the North Pacific (2000–2021). // *Persistent Organic Pollutants in the Ecosystems of the North Pacific* / eds. V. Tsygankov. Cham : Springer, Earth and Environmental Sciences Library, 2023. PP. 85–97. doi: 10.1007/978-3-031-44896-6_5

9. Tanabe S., Prudente M.S., Kan-atireklap S., Subramaniand A. Mussel Watch: Marine pollution monitoring of butyltins and organochlorines in coastal waters of Thailand, Philippines and India // *Ocean & Coastal Management*. 2000. Vol. 43, № 8–9. PP. 819–849. doi: 10.1016/S0964-5691(00)00060-0
10. Monirith I., Ueno D., Takahashi S., Nakata H., Sudaryanto A., Subramanian A., Karuppiah S., Ismail A., Muchtar M., Zheng J., Richardson B., Prudente M., Hue N.D., Tana T.S., Tkalin A.V., Tanabe S. Asia-Pacific mussel watch: monitoring contamination of persistent organochlorine compounds in coastal waters of Asian countries // *Marine Pollution Bulletin*. 2003. Vol. 46, № 3. PP. 281–300. doi: 10.1016/S0025-326X(02)00400-9
11. Ramu K., Kajiwaru N., Isobe T., Takahashi S., Kim E., Min B., We S., Tanabe S. Spatial distribution and accumulation of brominated flame retardants, polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in blue mussels (*Mytilus edulis*) from coastal waters of Korea // *Environmental Pollution*. 2007. Vol. 148, № 2. PP. 562–569. doi: 10.1016/j.envpol.2006.11.034
12. Byun G., Moon H., Choi J., Hwang J., Kang C. Biomagnification of persistent chlorinated and brominated contaminants in food web components of the Yellow Sea // *Marine Pollution Bulletin*. 2013. Vol. 73, № 1. PP. 210–219. doi: 10.1016/j.marpolbul.2013.05.017
13. Zhou S., Tang Q., Jin M., Liu W., Niu L., Ye H. Residues and chiral signatures of organochlorine pesticides in mollusks from the coastal regions of the Yangtze River Delta: Source and health risk implication // *Chemosphere*. 2014. Vol. 114. PP. 40–50. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.03.108
14. Mukai Y., Goto A., Tashiro Y., Tanabe S., Kunisue T. Coastal biomonitoring survey on persistent organic pollutants using oysters (*Saccostrea mordax*) from Okinawa, Japan: Geographical distribution and polystyrene foam as a potential source of hexabromocyclododecanes // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 739. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140049

References

1. Tsygankov V. The *Dirty Dozen* of the Stockholm Convention and other persistent organic pollutants: A review. In: *Persistent Organic Pollutants in the Ecosystems of the North Pacific*. Tsygankov V, editor. Cham: Springer, Earth and Environmental Sciences Library; 2023. pp. 1-48. doi: 10.1007/978-3-031-44896-6_1
2. El-Shahawi MS, Hamzaa A, Bashammakh AS, Al-Saggaf WT. An overview on the accumulation, distribution, transformations, toxicity and analytical methods for the monitoring of persistent organic pollutants. *Talanta*. 2009;80(5):1587-1597. doi: 10.1016/j.talanta.2009.09.055
3. Tanabe S. Asia-Pacific Mussel Watch progress report. *Marine Pollution Bulletin*. 2000;40(8):651. doi: 10.1016/S0025-326X(00)00019-9
4. Tsygankov V, Donets MM, Gumovskaya YP, Lyagussha MS, Gumovskiy AN, Chernyaev AP. Methods to determine persistent organic pollutants in various components of ecosystems in the Far Eastern region. In: *Persistent Organic Pollutants in the Ecosystems of the North Pacific*. Tsygankov V, editor. Cham : Springer, Earth and Environmental Sciences Library; 2023. pp. 49-56. doi: 10.1007/978-3-031-44896-6_2
5. Boyarova MD. Khlorirovannyye uglevodorody v gidrobiontakh zaliva Pos'eta Yaponskogo moraya [Chlorinated hydrocarbons in aquatic organisms of Posyet Bay, Sea of Japan]. *Izvestiya TINRO*. 2006;145:271-278. In Russian
6. Lao Q, Liu G, Zhou X, Chen F, Zhang S. Sources of polychlorinated biphenyls (PCBs) and dichlorodiphenyltrichloroethanes (DDTs) found in surface sediment from coastal areas of Beibu Gulf: A reflection on shipping activities and coastal industries. *Marine Pollution Bulletin*. 2021;167:112318. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112318

7. Tkalin AV, Lyshavskaya TS, Hills JW. Organochlorine pesticides in mussels and bottom sediments from Peter the Great Bay near Vladivostok. *Ocean Research*. 1997;19:115-119.
8. Borovkova AD, Mironova EK, Metreveli VE, Tsygankov V. Implementation of the Mussel Watch program by Russian scientists in the North Pacific (2000–2021). In: *Persistent Organic Pollutants in the Ecosystems of the North Pacific*. Tsygankov V, editor. Cham : Springer, Earth and Environmental Sciences Library; 2023. pp. 85-97. doi: 10.1007/978-3-031-44896-6_5
9. Tanabe S, Prudente MS, Kan-atireklap S, Subramaniand A. Mussel watch: Marine pollution monitoring of butyltins and organochlorines in coastal waters of Thailand, Philippines and India. *Ocean & Coastal Management*. 2000;43(8-9):819-849. doi: 10.1016/S0964-5691(00)00060-0
10. Monirith I, Ueno D, Takahashi S, Nakata H, Sudaryanto A, Subramanian A, Karupiah S, Ismail A, Muchtar M, Zheng J, Richardson B, Prudente M, Hue ND, Tana TS, Tkalin AV, Tanabe S. Asia-Pacific Mussel Watch: Monitoring contamination of persistent organochlorine compounds in coastal waters of Asian countries. *Marine Pollution Bulletin*. 2003;46(3):281-300. doi: 10.1016/S0025-326X(02)00400-9
11. Ramu K, Kajiwara N, Isobe T, Takahashi S, Kim E, Min B, We S, Tanabe S. Spatial distribution and accumulation of brominated flame retardants, polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in blue mussels (*Mytilus edulis*) from coastal waters of Korea. *Environmental Pollution*. 2007;148(2):562-569. doi: 10.1016/j.envpol.2006.11.034
12. Byun G, Moon H, Choi J, Hwang J, Kang C. Biomagnification of persistent chlorinated and brominated contaminants in food web components of the Yellow Sea. *Marine Pollution Bulletin*. 2013;73(1):210-219. doi: 10.1016/j.marpolbul.2013.05.017
13. Zhou S, Tang Q, Jin M, Liu W, Niu L, Ye H. Residues and chiral signatures of organochlorine pesticides in mollusks from the coastal regions of the Yangtze River Delta: Source and health risk implication. *Chemosphere*. 2014;114:40-50. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.03.108
14. Mukai Y, Goto A, Tashiro Y, Tanabe S, Kunisue T. Coastal biomonitoring survey on persistent organic pollutants using oysters (*Saccostrea mordax*) from Okinawa, Japan: Geographical distribution and polystyrene foam as a potential source of hexabromocyclododecanes. *Science of the Total Environment*. 2020;739:140049. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140049

Информация об авторах:

Боровкова Александра Дмитриевна, м. н. с. лаборатории геохимии, Тихоокеанский институт географии, Дальневосточное отделение Российской академии наук (Владивосток, Россия), аспирант Международной кафедры ЮНЕСКО «Морская экология», Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3285-822X>

E-mail: borovkovasdm@yandex.ru

Гаврилова Виктория Александровна, студент Международной кафедры ЮНЕСКО «Морская экология», Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7642-2936>

E-mail: jones.vika@mail.ru

Донец Максим Михайлович, м. н. с. лаборатории геохимии, Тихоокеанский институт географии, Дальневосточное отделение Российской академии наук (Владивосток, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2108-4448>

E-mail: maksim.donecz@mail.ru

Беланов Максим Андреевич, м. н. с. лаборатории геохимии, Тихоокеанский институт географии, Дальневосточное отделение Российской академии наук (Владивосток, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0974-9176>

E-mail: belanov.ma@gmail.com

Цыганков Василий Юрьевич, д-р биол. наук, доцент, в. н. с. лаборатории геохимии, Тихоокеанский институт географии, Дальневосточное отделение Российской академии наук (Владивосток, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5095-7260>

E-mail: tsig_90@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Aleksandra D. Borovkova, junior researcher of the Laboratory of Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russian Federation), postgraduate student of the UNESCO International Chair in Marine Ecology, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3285-822X>

E-mail: borovkovasdm@yandex.ru

Viktoriya A. Gavrilova, student of the UNESCO International Chair in Marine Ecology, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7642-2936>

E-mail: jones.vika@mail.ru

Maksim M. Donets, junior researcher of the Laboratory of Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2108-4448>

E-mail: maksim.donecz@mail.ru

Maksim A. Belanov, junior researcher of the Laboratory of Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0974-9176>

E-mail: belanov.ma@gmail.com

Vasily Yu. Tsygankov, Dr. Sci. (Biol.), Assoc. Prof., leading researcher of the Laboratory of Geochemistry, Pacific Geographical Institute, Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5095-7260>

E-mail: tsig_90@mail.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 23.10.2024;
одобрена после рецензирования 20.12.2024; принята к публикации 11.12.2025.*

*The article was submitted 23.10.2024;
approved after reviewing 20.12.2024; accepted for publication 11.12.2025.*