

Persistent organic pollutants in hydrobionts in river ecosystems of Crimea

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Malakhova L.V.^{1,2*}, Malakhova T.V.^{1,2}, Statkevich S.V.^{1,2},
Chesnokova I.I.^{1,2}, Kurshakov S.V.^{1,2}, Karpova E.P.^{1,2}

¹A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, 299011, Russia

²Research Center for Freshwater and Brackish Water Hydrobiology, Branch of the A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Sevastopol, 299011, Russia

ABSTRACT. For the first time, the content of persistent organic pollutants (DDT, its metabolites DDE and DDD, and six indicator congeners of polychlorinated biphenyls) was determined in several fish species (*Alburnoides maculatus*, *Squalius cephalus*, *Neogobius fluviatilis*) and shrimp (*Palaemon adspersus*) in three small Crimean rivers: the Alma, Belbek, and Chernaya. It was revealed that hydrobionts accumulated these substances, the composition and concentration levels of which varied significantly in different areas. In the Crimean spirin (*Alburnoides maculatus*) in the Belbek River and the silver prussian carp (*Carassius gibelio*) in a lake located in the lower catchment area of the Alma River, the highest concentrations of DDE, exceeding maximum permissible concentrations, as well as a high environmental risk from its impact, were determined. PCBs were either not detected or detected at low concentrations in fish tissue in rivers Alma and Belbek, indicating the absence of industrial sources of pollution, while agricultural pollution remains significant. A difference in the accumulation of persistent organic pollutants was revealed in the organs of the shrimp from the Chernaya River: the concentration of DDE and PCBs in the caviar was 10 to 20 times higher than in the muscle tissue. In the Chernaya River, a high environmental risk associated with the impact of congeners PCB 138 and 153 on the shrimp population was identified.

Keywords: DDE, PCB, *Alburnoides maculatus*, *Squalius cephalus*, *Neogobius fluviatilis*, *Palaemon adspersus*, small rivers, Crimea

For citation: Malakhova L.V., Malakhova T.V., Statkevich S.V., Chesnokova I.I., Kurshakov S.V., Karpova E.P. Persistent organic pollutants in hydrobionts in river ecosystems of Crimea // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 554-565. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-554

1. Introduction

The small rivers of Crimea – Chernaya, Belbek, and Alma – are important in the region, providing drinking water supply to the population and irrigation of agricultural land. At the same time, they are subject to serious pollution by industrial, agricultural, and domestic wastewater. The most dangerous anthropogenic environmental pollutants include persistent organic pollutants (POPs) such as organochlorine pesticides (p,p'-DDT and its metabolites p,p'-DDE and p,p'-DDD) and polychlorinated biphenyls (PCBs). Since the middle of the 20th century, these compounds have been widely used in industry and agriculture, which led to their large-scale distribution in the environment. Due to their exceptional chemical resistance, POPs are able to persist in ecosystems for

decades. POPs have low solubility in water, and high – in fats. This property causes their accumulation in the adipose tissues of living organisms and gradual transmission along the food chains, ultimately reaching humans. DDT and PCBs are classified as xenoestrogens, their effect on the endocrine system provokes the development of malignant neoplasms of the thyroid gland (Ejaz et al., 2004).

POPs pose a particular danger to the ecosystems of small rivers. The limited water volume determines the low dilution capacity of such watercourses, which significantly reduces their natural self-purification. Due to the high variability of the hydrological state of small rivers, traditional monitoring of water quality does not always provide a reliable assessment of the level of pollution in their ecosystems. In this regard, in order to more accurately assess the ecological state of rivers

*Corresponding author.

E-mail address: malakhovalv@ibss-ras.ru (L.V. Malakhova)

Received: July 13, 2025; **Accepted:** August 04, 2025;

Available online: August 31, 2025

© Author(s) 2025. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



in relation to POPs, their accumulation in bioindicator species, in particular, in malacofauna and ichthyofauna objects, is studied. To date, information on the content of these pollutants in the aquatic organisms of small rivers of the Crimea is limited to two publications, which report significant contamination of DDT and PCBs in fish and amphipods in the midstream Salgira ecosystem (Malakhova et al., 2023) and the content of POPs in aquatic plants and mollusks in the lower reaches of the Chernaya River (Malakhova et al., 2020). Concentrations of POPs in the aquatic organisms of other watercourses in the region, such as the Alma and Belbek Rivers, have not been previously reported. In this regard, the purpose of this work was to determine the levels of accumulation of POPs in the biotic components of ecosystems of small rivers of Crimea to assess their current ecological state.

2. Materials and methods

To fulfill the purpose of work in the summer season of 2024, samples of three species of fish from rivers were collected: Crimean spiralin *Alburnoides maculatus* (Kessler, 1859), chub *Squalius cephalus* (Linnaeus, 1758), and monkey goby *Neogobius fluviatilis* (Pallas, 1814). Crimean spiralin and chub belong to the Leuciscinae subfamily (Leuciscidae: Cypriniformes). These species differ in biological characteristics. Crimean spiralin, a small fish, a rheophile, keeps on the current in the core sections of the river. They do not make long seasonal migrations, moving along the riverbed is associated with the search for the most favorable conditions, especially during droughts. They are found almost everywhere in the Crimean rivers. The range of nutrition is quite wide, it includes various benthic and planktonic invertebrates, larvae and adult insects that fall into the water, less often algae. They are sensitive to the oxygen content. In fish communities in the Crimean rivers, it is the absolute dominant in number. Life expectancy is relatively short, up to 5 years, but usually 3–4 years. The chub is a eurybiont and a euryphagus, it tries to keep a calm current in the riverbed. In the rivers of Crimea, they usually grow to TL = 20–25 cm at the age of up to 6 years. It does not make large seasonal migrations; it swims along the riverbed in search of the most favorable conditions. The monkey goby *Neogobius fluviatilis* (Pallas, 1814) (Gobiidae: Gobiiformes) is a bottom sedentary species that feeds on invertebrates, small fish (young fry), and insect larvae. It rests on a sandy and muddy bottom in the calmest sections of the river. In the rivers of Crimea, it does not grow large (TL up to 12.5 cm, but usually less, age up to 3–4 years).

In the Alma River, sampling included crimean spiralin (38 specimens, avg. TL = 45 mm, avg. W = 1.1 g), chub (4 specimens, TL range 42–116 mm, W range 3–20.7 g), and monkey goby (2 specimens, TLs of 70 and 104 mm, weights of 3.8 and 13.8 g respectively). In the Belbek River, only crimean spiralin were collected (52 specimens, avg. TL = 55 mm, avg. W = 3.6 g). In the lake located in the lower Alma River catchment, five individuals of the prussian carp *Carassius gibelio*

(Bloch, 1782) (Cyprinidae: Cypriniformes) averaging 116 mm in TL and weighing 26.5 g each were selected. This alien species, eurybiont and euryphagus with a very wide range of nutrition is common in Crimean stagnant reservoirs (quarries, lakes, ponds, etc.).

In the spring-summer period of 2024, shrimp (*Palaemon adspersus* Rathke, 1837) were caught in the Chernaya River for analysis purposes. Muscle tissue was sampled from 10 individuals (both males and females), as well as eggs (from summer samples).

After trapping and biological analysis, samples of aquatic organisms were frozen and stored at -20 °C. Sample preparation included lyophilic drying for 48 hours, followed by homogenization of the material. Weighs of 5 g of fish homogenate, 3 g of shrimp muscle tissue, and 1.5 g of their eggs were taken for analysis in two replicates. Further processing of the samples included triple ultrasonic extraction for 30 minutes at a temperature of 35 °C using a mixture of polar and non-polar solvents (acetone:hexane, 1:3), followed by purification and evaporation of the extracts in accordance with MVI MN 2352–2005. The analysis was carried out by the gas chromatographic method in the Scientific and Educational Center for Collective Use "Spectrometry and Chromatography" of the Federal Research Center "Institute of Biology of the Southern Seas" on the Chromatech Crystal 5000 chromatograph (Russia) with an electron capture microdetector. The content of p,p'-DDT (hereinafter referred to as DDT), its metabolites p,p'-DDE and p,p'-DDD (hereinafter referred to as DDE and DDD), and six PCB congeners (according to IUPAC No. 28, 52, 101, 138, 153, and 180) was determined. Quantification of POPs was performed by the absolute calibration method within the linear range of the detector. Limits of detection (LOD) were 0.1 ng/g wet weight (ww) for PCBs congeners, DDD, and DDT and 0.03 ng/g ww for DDE. The limits of quantification (LOQ) were 0.1 ng/g and 0.05 ng/g wet weight, respectively. The analytical method was validated through intercalibration exercises organized by the IAEA Marine Environment Laboratories (IAEA-MEL). Absence of laboratory contamination was confirmed by testing blank samples, in which POPs levels were below the detection limit.

The concentrations of individual POPs, as well as the total values (Σ DDT for DDT and its metabolites and Σ 6PCB for the six PCB congeners), were calculated as the average values from three analytical replicates and are expressed in ng/g ww.

The environmental risk of POPs impact on aquatic organisms was assessed using the risk factor RQ (Lin et al., 2020): $RQ = MEC/PNEC$, where MEC means the measured concentration of POPs in aquatic organisms, and PNEC means the concentration of POPs below which no harmful effects on organisms will occur upon exposure. PNECs are typically calculated by dividing the toxicological dose descriptors (LC50 or EC50) by the estimated factor: $PNEC = (LC50 \text{ or } EC50)/\text{Assessment Factor}$. The most commonly used indicator for calculating PNEC mortality LC50, and the coefficient AF = 1000, were used in the work. LC50 indicators are taken from the open ECOTOX database (Toxicology data...) (Table 1). $RQ > 1$ means high risk,

$0.1 \leq RQ \leq 1$ means medium risk, $0.01 \leq RQ < 0.1$ means low risk, and $RQ < 0.01$ means insignificant risk (Lin et al., 2020).

Statistical calculations were performed using Microsoft Excel 2016. To assess the statistical significance of differences in POPs accumulation, the non-parametric Mann-Whitney U test was used.

3. Results

The concentration of POPs in the studied samples of hydrobionts varied in a wide range: ΣDDT – from 1.3 to 360.8, ΣPCB – from «not detected» to 186.2 ng/g (Tables 2, 3).

In all the samples studied, the main component of the DDT triad was the DDE metabolite, while the initial DDT pesticide and the second DDD metabolite were either not detected or were present in low and trace amounts (4.2 ng/g of DDD in the Crimean spirlin from the Belbek river and 0.44 ng/g of DDT in the chub in the Alma River). The highest concentrations of DDE were found in samples of prussian carp from the lake located in the lower Alma River catchment (351.1 ng/g) and Crimean spirlin from the Belbek River (356.5 ng/g). In shrimp muscle samples, only DDE was detected at relatively low concentrations (1.3–3.1 ng/g), in shrimp eggs, the level of DDE (28.4 ng/g) was 10–20 times higher than in their muscles. In male shrimp, muscle DDE concentrations were higher than in females (1.9–3.1 ng/g vs. 1.3–2.6 ng/g), but these differences were not statistically significant ($p > 0.05$).

The maximum concentrations of ΣPCB were found in shrimp eggs from the Black River (186.2 ng/g), mainly due to PCB 153 (73.3 ng/g) and PCB 138 (93.9 ng/g). In shrimp muscles, the content of ΣPCB was significantly lower (11.4–37.2 ng/g) than in eggs (Table 3).

Despite the lack of statistical significance ($p=0.133$), the concentrations of ΣPCB in male shrimp were more than 1.5 times higher than those in females. The observed pronounced trend requires additional research.

Table 1. Indicators of LC50 of DDT and its metabolites and PCB congeners for fish and crustaceans in freshwater ecosystems (Toxicology data...).

POPs	LC50 (mg/l)	
	Fish	Crustaceans
p,p'-DDE	0.096	0.0535
p,p'-DDD	0.11	0.009
p,p'-DDT	0.08	0.009
PCB 28	0.16	0.16
PCB 52	0.003	0.003
PCB 101	0.01	0.01
PCB 138	0.0026	0.001
PCB 153	0.0013	0.0013
PCB 180	0.025	0.001

In the Crimean spirlin from the Belbek River, PCBs were not found, and the content of PCBs in the Crimean spirlin, chub, and monkey goby from the Alma River was low (0.4–7.7 ng/g).

4. Discussion

Originating on the northern slopes of the Crimean Mountains, the Alma, Belbek, and Chernaya Rivers further flow mainly along the valleys, where their catchments are subject to significant anthropogenic impact. The main sources of pollution are untreated domestic wastewater, agricultural wastewater (in the late 1980s, up to 6 kg/ha of pesticides were used in Crimea, including DDT (Galiulin et al., 2019), and wastewater from landfills. Thus, in the territory of Crimea, 866.9 tons of prohibited and unidentified pesticides were accumulated at 28 solid waste landfills (Dubrovin and Dubrovin, 2017).

The predominance of DDE in the samples of aquatic organisms indicates the absence of fresh intake of the original pesticide for a long time, since DDE is formed in the process of relatively slow aerobic

Table 2. The concentration of DDT and its metabolites (ng/g wet weight) in the hydrobionts of the Alma, Belbek, and Chernaya Rivers.

No.	Sampling area	Sampling date	Facility	Sex	Tissues & organs	p,p'-DDE	p,p'-DDD	p,p'-DDT	ΣDDT
1	Chernaya River	17.05.2024	shrimp	-	eggs	28.4	ND	ND	28.4
2	Chernaya River	17.05.2024	shrimp	males	muscles	3.1	->-	->-	3.1
3	Chernaya River	17.05.2024	shrimp	females	muscles	2.6	->-	->-	2.6
4	Chernaya River	06.08.2024	shrimp	males	muscles	1.9	->-	->-	1.9
5	Chernaya River	06.08.2024	shrimp	females	muscles	1.3	->-	->-	1.3
6	Belbek River	05.08.2024	Crimean spirlin	N/Det	whole fish	356.5	4.2	->-	360.8
7	Alma River, middle course	09.08.2024	Crimean spirlin	->-	whole fish	99.6	ND	->-	99.6
8	Alma River, middle course	09.08.2024	chub	->-	whole fish	47.8	->-	0.4	48.2
9	Alma River, lower course	09.08.2024	monkey goby	->-	whole fish	31.4	->-	->-	31.4
10	Lake located in the lower Alma River catchment	09.08.2024	prussian carp	->-	whole fish	351.1	->-	->-	351.1

Note: N/Det – was not determined, ND – not detected.

Table 3. The concentration of PCBs (ng/g wet weight) in the hydrobionts of the Alma, Belbek, Chernaya Rivers.

No.	Sampling area	Facility	PCB 28	PCB 52	PCB 101	PCB 153	PCB 138	PCB 180	Σ6PCB
1	Chernaya River	Shrimp, eggs	2.1	1.6	5.1	73.3	93.9	10.3	186.2
2	Chernaya River	Shrimp, ♂, muscles	0.1	1.0	1.5	14.7	17.4	2.5	37.2
3	Chernaya River	Shrimp, ♀, muscles	ND	1.2	1.3	7.8	10.0	1.1	21.4
4	Chernaya River	Shrimp, ♂, muscles	0.5	0.5	1.3	5.4	5.9	0.6	14.2
5	Chernaya River	Shrimp, ♀, muscles	ND	0.1	0.5	4.5	5.5	0.7	11.4
6	Belbek River	Crimean spirilin	—	ND	ND	ND	ND	ND	ND
7	Alma River, middle course	Crimean spirilin	0.8	0.6	3.0	1.0	2.2	0.1	7.7
8	Alma River, middle course	Chub	0.1	0.3	0.6	0.3	ND	ND	1.3
9	Alma River, lower course	Monkey goby	ND	0.1	ND	0.2	1.3	0.1	1.8
10	Lake located in the lower Alma River catchment	Prussian carp	—	0.4	—	ND	ND	ND	0.4

Note: ND – not detected.

metabolism of DDT. DDE is highly resistant to further degradation and is capable of accumulating in the lipid tissues of aquatic organisms. The excess concentration of DDE in fish, in comparison with shrimp, may be associated with a trophic level: fish, being predators or omnivores, receive DDE along the food chain. In addition, a higher level of pesticidal pollution in the fish habitat plays an important role. The highest concentrations of DDE in fish in the Belbek River and in the lake located in the lower Alma River catchment indicate the existence of local sources of DDE in their ecosystems.

The observed excess concentrations of DDE and Σ6PCB in shrimp eggs compared to muscle tissue were first reported for this species. These results are consistent with known literature data on the mechanism of transgenerational transfer of POPs (Robaire et al., 2022) from Black Sea aquatic organisms to offspring through sexual products. Thus, in the Black Sea kalkan (*Scophthalmus maeoticus*), the concentrations of DDT and its metabolites in the eggs exceeded those in the muscle tissue of females by 10 times (Malakhova et al., 2014), and in the Mediterranean mussels (*Mytilus galloprovincialis*), the sweeping of sexual products led to a 2-fold decrease in the content of POPs in gonads due to their excretion with eggs and spermatozoa (Nikonova et al., 2017).

The comparison of the concentrations of POPs with the MPC for freshwater fish showed that for ΣDDT (300 ng/g wet weight), the MPC was exceeded in the Crimean spirilin in the Belbek River and in the prussian carp in the lake. For ΣPCB, the established concentration standards, which are 2000 ng/g wet weight, in the liver – 5000 ng/g, were not exceeded (Technical Regulation...).

A comparison of PCB concentrations in fish from Crimean rivers with those reported for other European freshwater ecosystems indicates that PCB levels in Crimean fish (Σ6PCBs: 1.3-7.7 ng/g ww) are comparable to those in pristine European ecosystems, particularly those reported for background sites like Burgas Lake in Bulgaria (ΣPCBs: 1.6 ng/g ww). In contrast, DDT contamination in fish from the Alma and Belbek rivers (Σ3DDTs: 31.4-360.8 ng/g ww) – despite

the lack of documented local industrial DDT sources in the past 30 years – falls into a moderately high category, positioned between lower levels in Bulgaria (Georgieva et al., 2015: Σ3DDTs 3.99 ng/g ww) and elevated concentrations near historically contaminated sites in Spain (Lacorte et al., 2006: Σ6DDTs 616 ng/g ww) and Poland (Niewiadowska et al., 2014: Σ6DDTs 654 ng/g ww) (Table 4).

RQ calculations revealed significant differences in the value of environmental risk between species. The situation is especially alarming with the shrimp population, for which the maximum environmental risk exceeded the critical values by a factor of tens. The highest values were obtained for hexachlorobiphenyls 138 (RQ = 2-93) and 153 (RQ = 3-56).

Analysis of environmental risk factors for ichthyofauna revealed regional differences. Excesses of safe RQ values were found in two species: Crimean spirilin in the Belbek River (RQ = 3.7) and prussian carp in the lake in the lower Alma River catchment (RQ = 3.7). For the chub and the monkey goby in the Alma River, the risk from DDE contamination was within the medium risk range (RQ = 0.1–0.5).

In the course of research, a long-standing ecotoxicological paradox was noted, when hydrobionts, on the one hand, effectively clean the aquatic environment of hydrophobic POPs, acting as natural biofilters, and on the other hand, become victims of chronic intoxication with a long presence of POPs in organisms. Therefore, the results obtained indicate the need to develop measures to monitor critically polluted sites, identify the main sources of POPs in these areas, and prevent further pollution of small river ecosystems with these dangerous pollutants.

5. Conclusions

This study is the first to assess both DDT and PCB levels in hydrobionts from small rivers of the northern Pontic region (Alma, Belbek, and Chernaya rivers), thereby contributing to a better understanding of the spatial distribution and potential ecological risks of persistent organic pollutants in Eastern Europe. DDE, a persistent metabolite of the banned pesticide DDT,

Table 4. DDT, its metabolites and PCB content (ng/g ww) in fish from confirmed or suspected industrially contaminated and "background" European waters.

Object	Years	Area	DDT	ΣPCBs	Reference	Comment
Chub <i>Leuciscus cephalus</i> (muscle)	2001	Lake Iseo (Italy)	- ¹	105.9 – 786.4 ng/g	(Binelli and Provini, 2003)	nd ²
Barbel <i>Barbus bocagei</i> (muscle)	2002	Sinca River, Spain	Not detected	-	(Lacorte et al., 2006)	Above the dicofol plant
	2003		616 ng/g ³ (Σ6DDTs ⁴)			Near the dicofol production plant
12 species of freshwater fish (muscle)	2003	River Dro ^u me (France)	-	7.8-56.9 ng/g	(Mazet et al., 2005)	nd
Roach <i>Rutilus rutilus</i> (whole fish)	2011	River Lee at Whitwell (UK)	88 ± 70 ng/g (Σ6DDTs)	-	(Jürgens et al., 2016)	Near the area of the DDT plant, closed in 1982.
Bream <i>Abramis brama</i> (muscle)	2011-2012	River Vistula (Wisła) near Cracow (Poland)	654 ng/g (Σ6DDTs)	-	(Niewiadomska et al., 2014)	nd
Gibel carp <i>Carassius gibelio</i>	2014	Lakes Burgas and Mandra, Bulgaria	3.99 ng/g (Σ3DDTs ⁵)	1.6 ng/g (Σ15 PCBs ⁶)	(Georgieva et al., 2015)	nd
European eel <i>Anguilla anguilla</i> (muscle)	2020	Rasha River, Croatia	4.97–17.3 ng/g (Σ3DDTs)	2.31–32.8 ng/g (Σ7PCBs ⁷)	(Kljaković-Gašpić et al., 2023)	nd
3 species of fish (whole fish)	2024	Alma and Belbek Rivers (Crimea, Russia)	31.4-360.8 ng/g (Σ3DDTs)	1.3-7.7 ng/g (Σ6 PCBs ⁸)	This study	nd

Note: ¹ – not determined, ² – no data available, ³ – converted from µg/kg as indicated in the original source, ⁴ – sum concentration of o,p'-DDT, p,p'-DDT, o,p'-DDE, p,p'-DDE, o,p'-DDD, and p,p'-DDD, ⁵ – sum concentration of p,p'-DDT, p,p'-DDE, and p,p'-DDD, ⁶ – sum concentration of fifteen PCB congeners, ⁷ – sum concentration of seven indicator PCB congeners (#28, 52, 101, 118, 138, 153, and 180), ⁸ – sum concentration of six indicator PCB congeners (#28, 52, 101, 138, 153, and 180).

was detected in all sampled water bodies, indicating historical contamination. Concentrations exceeded maximum permissible levels in Crimean spiralin (*Alburnoides tauricus*) from the Belbek River and pussian carp (*Carassius gibelio*) from the lower Alma River catchment.

PCBs were either not detected or detected at low concentrations in fish tissue, indicating the absence of major industrial sources of pollution, while agricultural pollution remains significant. These results highlight the need for ongoing monitoring and measures to reduce the release of toxicants into rivers.

In the Chernaya River, shrimp tissues showed differences in POP accumulation: eggs contained higher levels of contaminants than muscle tissue, suggesting transgenerational transfer of POPs. Additionally, a high environmental risk was associated with the presence of PCB congeners 138 and 153 in shrimp organs.

Overall, the study demonstrates that assessing POP levels in aquatic organisms is a valuable approach for evaluating the ecological condition of small Crimean rivers, especially when pollutant concentrations in water are below detection limits.

Acknowledgements

This work was carried out within the framework of IBSS state research assignment "Study

of biogeochemical patterns of radioecological and chemoecological processes in the ecosystems of water bodies of the Sea of Azov–Black Sea Basin in comparison with other areas of the World Ocean and individual aquatic ecosystems of their drainage basins to ensure sustainable development in the southern seas of Russia" (No. 124030100127-7), "Biodiversity as the basis for the sustainable functioning of marine ecosystems, criteria and scientific principles for its conservation" (No. 124022400148-4) and "Studying the features of the structure and dynamics of freshwater ecosystems of the Northern Black Sea Region" (No. 123101900019-5)

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Binelli A., Provini A. 2003. The PCB pollution of Lake Iseo (N. Italy) and the role of biomagnification in the pelagic food web. *Chemosphere* 53: 143–151. DOI: [10.1016/S0045-6535\(03\)00441-7](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00441-7)
- Dubrovina I.R., Dubrovina E.R. 2017. To a question of ecological safety of the Autonomous Republic of Crimea. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa* [Technical and Technological Problems of Service] 4(42): 24-28. (in Russian)

Ejaz S., Akram W., Lim C.W. et al. 2004. Endocrine disrupting pesticides: a leading cause of cancer among rural people in Pakistan. *Experimental oncology* 26: 98-105. PMID: 15273660

Galiulin R.V., Galiulina R.A., Khorobrykh R.R. et al. 2019. Risk of modern contamination of river waters by pesticide DDT and HCH. *Issues of Risk Analysis* 16(5): 62-69. DOI: [10.32686/1812-5220-2019-16-5-62-69](https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-5-62-69) (in Russian)

Georgieva S., Stancheva M., Makedonski L. 2015. Persistent organochlorine compounds (PCBs, DDTs, HCB & HBDE) in wild fish from the Lake Burgas and Lake Mandra, Bulgaria. *Journal of International Scientific Publications* 9: 515-523.

Jürgens M.D., Crosse J., Hamilton P.B. et al. 2016. The long shadow of our chemical past—high DDT concentrations in fish near a former agrochemicals factory in England. *Chemosphere* 162: 333-344. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2016.07.078](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.07.078)

Kljaković-Gašpić Z., Dvorščak M., Orct T. et al. 2023. Metal (loid) s and persistent organic pollutants in yellow European eel from the Raša River, Croatia. *Marine pollution bulletin* 187: 114527. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2022.114527](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114527)

Lacorte S., Raldúa D., Martínez E. et al. 2006. Pilot survey of a broad range of priority pollutants in sediment and fish from the Ebro river basin (NE Spain). Pilot survey of a broad range of priority pollutants in sediment and fish from the Ebro river basin (NE Spain). *Environmental Pollution* 140: 471-482. DOI: [10.1016/j.envpol.2005.08.008](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.08.008)

Lin X., Xu J., Keller A.A. et al. 2020. Occurrence and risk assessment of emerging contaminants in a water reclamation and ecological reuse project. *Science of the Total Environment* 744: 140977. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.140977](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140977)

Malakhova L., Giragosov V., Khanaychenko A. et al. 2014. Partitioning and level of organochlorine compounds in the tissues of the Black Sea Turbot at the South-Western Shelf of Crimea. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 14(5): 993-1000.

Malakhova L.V., Egorov V.N., Malakhova T.V. et al. 2020. Organochlorine compounds content in the components of the Black River ecosystem and assessment of their inflow to the Sevastopol Bay in the winter season 2020. *International Journal of Applied and fundamental research* 5: 7-14. DOI: [10.17513/mjpf.13061](https://doi.org/10.17513/mjpf.13061) (in Russian)

Malakhova L.V., Karpova E.P., Belogurova R.E. et al. 2023. Organochlorine xenobiotics in the Salgir River ecosystem: content, distribution, ecological risk. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea* 4: 116-133.

Mazet A., Keck G., Berny P. 2005. Concentrations of PCBs, organochlorine pesticides and heavy metals (lead, cadmium, and copper) in fish from the Drôme River: potential effects on otters (*Lutra lutra*). *Chemosphere* 61(6): 810-816. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2005.04.056](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.04.056)

Niewiadowska A., Kiljanek T., Semeniuk S. et al. 2014. Contamination of omnivorous freshwater fish species and sediments by chlorinated hydrocarbons in Poland. *Journal of Veterinary Research* 58(3): 405-411.

Nikonova L.L., Malakhova L.V., Nekhoroshev M.V. et al. 2017. Organochlorine compounds in gonads and gametes of bivalve mollusk *Mytilus galloprovincialis* Lam., cultivated near the shores of the Crimea (the Black sea). *Voda: himiya i ekologiya [Water: Chemistry and Ecology]* 3: 40-45. (in Russian)

Robaire B., Delbes G., Head J.A. et al. 2022. A cross-species comparative approach to assessing multi-and transgenerational effects of endocrine disrupting chemicals. *Environmental Research* 204: 112063. DOI: [10.1016/j.envres.2021.112063](https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112063)

Technical Regulation of the Customs Union "On Safety of Food Products" (TR CU 021/2011). 2011. Online resource. URL: <https://www.gost.ru/portal/gost/home/standarts/technicalregulationses>

Toxicology data were retrieved from the ECOTOX Knowledgebase. 2025. Online resource. URL: <https://cfpub.epa.gov/ecotox/search.cfm> (accessed 09.04.2025)

Стойкие органические загрязнители в гидробионтах в речных экосистемах Крыма

Краткое сообщение

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYМалахова Л.В.^{1,2*}, Малахова Т.В.^{1,2}, Статкевич С.В.^{1,2},
Чеснокова И.И.^{1,2}, Куршаков С.В.^{1,2}, Карпова Е.П.^{1,2}¹ ФИЦ "Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН", Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Россия² "Научно-исследовательский центр пресноводной и солоноватоводной гидробиологии" - филиал ФИЦ ИнБЮМ, Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Россия

АННОТАЦИЯ. Впервые определено содержание стойких органических загрязнителей (ДДТ, его метаболитов ДДЭ и ДДД и шести индикаторных конгенов полихлорбифенилов) в нескольких видах рыб (*Alburnoides bipunctatus*, *Squalius cephalus*, *Neogobius fluviatilis*) и травяной креветке (*Palaemon adspersus*) в трех малых реках Крыма: Альма, Бельбек, Черная. Выявлено, что гидробионты накапливали эти вещества, состав и уровень концентраций которых существенно отличался в разных районах. В быстрянке в р. Бельбек и серебряном карасе в озере у села Песчаное (водосбор р. Альма) определены наиболее высокие, превышающие ПДК, концентрации ДДЭ, а также высокий экологический риск от его воздействия. ПХБ в тканях рыб либо не обнаружены, либо обнаружены в низких концентрациях, что указывает на отсутствие крупных промышленных источников загрязнения, в то время как сельскохозяйственное загрязнение в этих реках остается значительным. Выявлено различие в накоплении стойких органических загрязнителей в органах травяной креветки из реки Черная: концентрация ДДЭ и ПХБ в икре была от 10 до 20 раз выше, чем в мышцах. В р. Черная выявлен высокий экологический риск, связанный с воздействием конгенов ПХБ 138 и 153 на популяцию травяной креветки.

Ключевые слова: ДДЭ, ПХБ, *Alburnoides bipunctatus*, *Squalius cephalus*, *Neogobius fluviatilis*, *Palaemon adspersus*, малые реки, Крым

Для цитирования: Малахова Л.В., Малахова Т.В., Статкевич С.В., Чеснокова И.И., Куршаков С.В., Карпова Е.П. Стойкие органические загрязнители в гидробионтах в речных экосистемах Крыма // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 554-565. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-554

1. Введение

Малые реки Крыма Черная, Бельбек, Альма имеют важное значение в регионе, обеспечивая питьевое водоснабжение населения и орошение сельскохозяйственных земель. При этом они подвержены серьезному загрязнению промышленными, сельскохозяйственными и бытовыми стоками. К наиболее опасным антропогенным загрязнителям окружающей среды относят такие стойкие органические загрязнители (СОЗ), как хлорорганические пестициды (п,п'-ДДТ и его метаболиты п,п'-ДДЭ и п,п'-ДДД) и полихлорбифенилы (ПХБ). С середины XX века эти соединения нашли широкое применение в промышленности и сельском хозяйстве, что привело к их масштабному распространению в окружающей

среде. Благодаря своей исключительной химической устойчивости, СОЗ способны сохраняться в экосистемах в течение десятилетий. СОЗ имеют низкую растворимость в воде, высокую – в жирах. Это свойство обуславливает их накопление в жировых тканях живых организмов и постепенную передачу по пищевым цепям, достигая в конечном итоге и человека. ДДТ и ПХБ отнесены к группе ксеноэстрогенов, их воздействие на работу эндокринной системы провоцирует развитие злокачественных новообразований щитовидной железы (Ejaz et al., 2004).

Особую опасность СОЗ представляют для экосистем малых рек. Ограниченный водный объем определяет низкую разбавляющую способность таких водотоков, что существенно снижает их естественное самоочищение. Вследствие высокой

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: malakhovalv@ibss-ras.ru (Л.В. Малахова)

Поступила: 13 июля 2025; Принята: 04 августа 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025

© Автор(ы) 2025. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



изменчивости гидрологического состояния малых рек традиционный мониторинг качества воды не всегда обеспечивает достоверную оценку уровня загрязнения их экосистем. В связи с этим для более точной оценки экологического состояния рек в отношении СОЗ изучают их накопление в биоиндикаторных видах, в частности, в объектах малако- и ихтиофауны. На сегодняшний день сведения о содержании этих загрязнителей в гидробионтах малых рек Крыма ограничены двумя публикациями, в которых сообщается о значительном загрязнении ДДТ и ПХБ в рыбах и амфиподах в экосистеме среднего течения Салгира (Malakhova et al., 2023) и о содержании СОЗ в водных растениях и моллюсках в нижнем течении р. Черной (Малахова и др., 2020). Информация о концентрациях СОЗ в гидробионтах других водотоков региона, таких как Альма и Бельбек, ранее отсутствовала. В связи с этим целью данной работы стало определение уровней накопления СОЗ в биотических компонентах экосистем малых рек Крыма для оценки их современного экологического состояния.

2. Материалы и методы

Для выполнения цели работы в летний сезон 2024 г. были собраны образцы трех видов рыб из рек: быстрянки крымской *Alburnoides maculatus* (Kessler, 1859), голавля *Squalius cephalus* (Linnaeus, 1758) и бычка-песочника *Neogobius fluviatilis* (Pallas, 1814). Быстрянка и голавль относятся к подсемейству Leuciscinae (Leuciscidae: Cypriniformes). Эти виды отличаются биологическими особенностями. Быстрянка, небольшая рыба, реофил, держится на течении в стержневых участках реки. Не совершает дальних сезонных миграций, перемещение по руслу реки связано с поиском наиболее благоприятных условий особенно во время засух. В крымских реках встречаются почти повсеместно. Спектр питания достаточно широкий, в него входят различные бентосные и планктонные беспозвоночные, личинки и взрослые насекомые попадающие в воду, реже водоросли. Чувствительны к содержанию кислорода. В сообществах рыб в крымских реках абсолютный доминант по численности. Продолжительность жизни относительно не велика, до 5 лет, но обычно 3-4 года. Голавль эврибионт и эврифаг, в русле реки он старается держаться спокойного течения. В реках Крыма обычно вырастают до TL = 20-25 см при возрасте до 6 лет. Больших сезонных миграций не совершает, по руслу плавает в поисках наиболее благоприятных условий. Бычок-песочник *Neogobius fluviatilis* (Pallas, 1814) (Gobiidae: Gobiiformes) донный оседлый вид, питается беспозвоночными, мелкими рыбами (мальками), личинками насекомых. Держится на песчаном и илистом дне в наиболее спокойных участках реки. В реках Крыма он не вырастает крупным (TL до 12,5 см, но обычно меньше, возраст до 3-4 лет).

В Альме были отобраны 38 особей быстрянки со средней длиной (TL) 45 мм, средней массой (W) -

1,1 г, голавль (4 особи, диапазон TL от 42 до 116 мм, W – от 3 до 20,7 г) и бычки-песочники (2 особи, TL – от 70 и 104 мм, W 3,8 и 13,8 г), в Бельбеке – быстрянки (52 особи, средняя TL - 55 мм, W – 3,6 г). В озере у села Песчаное (расположенном на водосборе Альмы) были отловлены 5 особей (средняя TL составила 116 мм, W – 26,5 г) серебряного карася *Carassius gibelio* (Bloch, 1782) (Cyprinidae: Cypriniformes). Это вид-вселенец, эврибионт и эврифаг с очень широким спектром питания распространен в крымских стоячих водоемах (карьеры, озера, пруды и т.д.).

В р. Чёрная в весенне-летний период 2024 г. отлавливали травяных креветок *Palaemon adspersus* (Rathke, 1837), у которых для анализа отбирали мышечную ткань от 20 особей самцов и самок, а также икру (в летних пробах).

После отлова и биологического анализа пробы гидробионтов замораживали и хранили при -20°C. Пробоподготовка включала лиофильную сушку в течение 48 часов с последующей гомогенизацией материала. Для анализа в двух повторностях отбирали навески по 5 г гомогената рыбы, по 3 г мышечной ткани креветок и по 1,5 г их икры. Дальнейшая обработка проб включала трехкратную ультразвуковую экстракцию в течении 30 минут при температуре 35°C с использованием смеси полярного и неполярного растворителей (ацетон:гексан, 1:3), последующую очистку и упаривание экстрактов в соответствии с МВИ МН 2352–2005. Анализ проводили газохроматографическим методом в НОЦКП «Спектрометрия и Хроматография» ФИЦ ИнБЮМ на хроматографе Хроматэк Кристалл 5000 (Россия) с микродетектором электронного захвата. Определяли содержание п,п'-ДДТ (далее ДДТ), его метаболитов п,п'-ДДЭ и п,п'-ДДД (далее ДДЭ и ДДД), и шести конгенов ПХБ (по IUPAC № 28, 52, 101, 138, 153 и 180). Количественное определение СОЗ выполняли методом абсолютной калибровки в пределах линейного диапазона детектора. Пределы обнаружения для анализируемых соединений составили 0,1 нг/г сырой массы для конгенов ПХБ, п,п'-ДДТ и п,п'-ДДД и 0,05 нг/г сырой массы - для п,п'-ДДЭ, пределы определения – 0,1 и 0,05 нг/г сырой массы соответственно. Аналитический метод валидирован в ходе интеркалибрационных испытаний Морской лаборатории МАГАТЭ (IAEA-MEL). Отсутствие лабораторного загрязнения подтверждено анализом «холостых» проб, в которых уровни аналитов были ниже предела обнаружения.

Концентрации отдельных СОЗ, а также суммарные показатели (ΣДДТ для ДДТ и его метаболитов и ΣПХБ для шести конгенов ПХБ) рассчитаны как средние значения из трех аналитических повторностей и выражены в нг/г сырой массы.

Экологический риск воздействия СОЗ на гидробионты оценивали с помощью коэффициента риска RQ (Lin et al., 2020): $RQ = MEC/PNEC$, где MEC означает измеренную концентрацию СОЗ в гидробионтах, а PNEC – концентрация СОЗ, ниже которой не возникнет никаких вредных последствий для организмов при воздействии. PNEC обычно рассчитываются делением дескрипторов

токсикологических доз (LC50 или EC50) на оценочный коэффициент: $PNEC = (LC50 \text{ или } EC50) / \text{Assessment Factor}$. В работе использовали наиболее часто применяемый для расчета PNEC показатель смертность LC50, и коэффициент $AF = 1000$. Показатели LC50 взяты из открытой базы данных ECOTOX (Toxicology data...) (Таблица 1). Значения $RQ > 1$ означают высокий риск, $0,1 \leq RQ \leq 1$ – средний риск, $0,01 \leq RQ < 0,1$ – низкий риск, $RQ < 0,01$ – незначительный риск (Lin et al., 2020).

Статистические расчеты выполнены в программе Microsoft Excel 2016. Для оценки статистической значимости различий в накоплении СОЗ применяли непараметрический U-критерий Манна-Уитни.

3. Результаты

Концентрация СОЗ в исследованных пробах гидробионтов изменялась в широком диапазоне: ΣDDT – от 1,3 до 360,8, ΣPHX – от «не обнаружено» до 186,2 нг/г (Таблицы 2, 3).

Во всех исследованных пробах основным компонентом триады ДДТ оказался метаболит ДДЭ, тогда как исходный пестицид ДДТ и второй метаболит ДДД либо не обнаружены, либо присутствовали в невысоких и следовых количествах (4,2 нг/г ДДД в быстрянке из р. Бельбек и 0,44 нг/г ДДТ в голавле в р. Альма). Наибольшие концентрации ДДЭ обнаружены в пробах серебряного карася из озера на вобосборе нижнего течения р. Альма (351,1 нг/г), быстрянке из р. Бельбек (356,5 нг/г). В пробах мышц креветок был обнаружен только ДДЭ в относительно невысоких концентрациях (1,3–3,1 нг/г), в икре креветок уровень ДДЭ (28,4 нг/г) оказался от 10 до 20 раз выше, чем в их мышцах. У самцов креветок концентрации ДДЭ в мышцах были выше, чем у самок (1,9–3,1 нг/г против 1,3–2,6 нг/г), но эти различия не были статистически значимыми ($p > 0,05$).

Максимальные концентрации ΣPHX найдены в икре креветок из р. Чёрная (186,2 нг/г), преимущественно за счёт ПХБ 153 (73,3 нг/г) и РСВ

Таблица 1. Показатели LC50 ДДТ и его метаболитов и конгенов ПХБ для рыб и ракообразных в пресноводных экосистемах (Toxicology data...)

СОЗ	LC50 (мг/л)	
	Рыбы	Ракообразные
п,п'-ДДЭ	0,096	0,0535
п,п'-ДДД	0,11	0,009
п,п'-ДДТ	0,08	0,009
ПХБ 28	0,16	0,16
ПХБ 52	0,003	0,003
ПХБ 101	0,01	0,01
ПХБ 138	0,0026	0,001
ПХБ 153	0,0013	0,0013
ПХБ 180	0,025	0,001

138 (93,9 нг/г). В мышцах креветок содержание ΣPHX значительно ниже (11,4–37,2 нг/г), чем в икре (Таблица 3).

Несмотря на отсутствие статистической значимости ($p = 0,133$), концентрации ΣPHX у самцов креветки более чем в 1,5 раза превышали таковые у самок. Наблюдаемая выраженная тенденция требует дополнительного исследования.

В быстрянке из р. Бельбек ПХБ не были обнаружены, а содержание ПХБ в быстрянке, голавле, бычках из р. Альма оказалось невысоким (0,4–7,7 нг/г).

4. Обсуждение

Берущие начало на северных склонах Крымских гор реки Альма, Бельбек и Чёрная далее протекают преимущественно по долинам, где их водосборные бассейны подвергаются существенному антропогенному воздействию. Основными источниками загрязнения являются неочищенные хозяйственно-бытовые стоки, сельскохозяйственные стоки (в конце 1980-х годов в Крыму применялось

Таблица 2. Концентрация ДДТ и его метаболитов (нг/г сырой массы) в гидробионтах р. Альма, Бельбек, Черная

№	Район отбора	Дата отбора	Объект	Пол	Ткани и органы	п,п'-ДДЭ	п,п'-ДДД	п,п'-ДДТ	ΣDDT
1	р. Черная	17.05.2024	креветки	-	икра	28,4	н.о.	н.о.	28,4
2	р. Черная	17.05.2024	креветки	самцы	мышцы	3,1	«-»	«-»	3,1
3	р. Черная	17.05.2024	креветки	самки	мышцы	2,6	«-»	«-»	2,6
4	р. Черная	06.08.2024	креветки	самцы	мышцы	1,9	«-»	«-»	1,9
5	р. Черная	06.08.2024	креветки	самки	мышцы	1,3	«-»	«-»	1,3
6	р. Бельбек	05.08.2024	быстрянка	н.опр.	целиком	356,5	4,2	«-»	360,8
7	р. Альма, среднее течение	09.08.2024	быстрянка	«-»	целиком	99,6	н.о.	«-»	99,6
8	р. Альма, среднее течение	09.08.2024	голавль	«-»	целиком	47,8	«-»	0,4	48,2
9	р. Альма, нижнее течение	09.08.2024	бычки песочники	«-»	целиком	31,4	«-»	«-»	31,4
10	озеро на водосборе нижнего течения р. Альма	09.08.2024	карась серебряный	«-»	целиком	351,1	«-»	«-»	351,1

Примечание: н.опр. – не определяли, н.о. – не обнаружено

Таблица 3. Концентрация ПХБ (нг/г сырой массы) в гидробионтах р. Альма, Бельбек, Черная

№	Район отбора	Объект	PCB 28	PCB 52	PCB 101	PCB 153	PCB 138	PCB 180	Σ6ПХБ
1	р. Черная	Креветки, икра	2,1	1,6	5,1	73,3	93,9	10,3	186,2
2	р. Черная	Креветки, ♂, мышцы	0,1	1,0	1,5	14,7	17,4	2,5	37,2
3	р. Черная	Креветки, ♀ мышцы	н.о.	1,2	1,3	7,8	10,0	1,1	21,4
4	р. Черная	Креветки, ♂, мышцы	0,5	0,5	1,3	5,4	5,9	0,6	14,2
5	р. Черная	Креветки, ♀, мышцы	н.о.	0,1	0,5	4,5	5,5	0,7	11,4
6	р. Бельбек	Быстрянка, целиком	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
7	р. Альма, среднее течение	Быстрянка, целиком	0,8	0,6	3,0	1,0	2,2	0,1	7,7
8	р. Альма, среднее течение	Голавль, целиком	0,1	0,3	0,6	0,3	н.о.	н.о.	1,3
9	р. Альма, нижнее течение	Бычки песочники, целиком	н.о.	0,1	н.о.	0,2	1,3	0,1	1,8
10	озеро на водосборе нижнего течения р. Альма	Карась серебряный, целиком	н.о.	0,4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,4

Примечание: н.о. – не обнаружено

до 6 кг/га пестицидов, включая ДДТ (Галиулин и др., 2019), стоки с мусорных полигонов. Так, на территории Крыма на 28 полигонах твердых отходов накоплено 866,9 т запрещенных и неопознанных пестицидов (Дубровин и Дубровин, 2017).

Преобладание ДДЭ в пробах гидробионтов свидетельствует об отсутствии свежего поступления исходного пестицида в течение длительного времени, поскольку ДДЭ образуется в процессе относительно медленного аэробного метаболизма ДДТ. ДДЭ отличается высокой устойчивостью к дальнейшей деградации и способностью к накоплению в липидных тканях гидробионтов. Превышение концентрации ДДЭ в рыбах, в сравнении с креветками, может быть связано с трофическим уровнем: рыбы, будучи хищниками или всеядными, получают ДДЭ по пищевой цепи. Кроме того, важную роль, играет и более высокий уровень пестицидного загрязнения среды обитания рыб. Наибольшие концентрации ДДЭ у рыб в р. Бельбек и в озере на водосборе в нижнем течении р. Альма свидетельствует о существовании локальных источников поступления ДДЭ в их экосистемы.

Наблюдаемое превышение концентраций ДДЭ и Σ6ПХБ в икре травяных креветок по сравнению с мышечной тканью впервые зарегистрировано для данного вида. Эти результаты согласуются с известными литературными данными о механизме трансгенерационного переноса СОЗ (Robaire et al., 2022) от черноморских гидробионтов к потомству через половые продукты. Так, у черноморского калкана (*Scophthalmus maeoticus*) концентрации ДДТ и его метаболитов в икре превышали таковые в мышечной ткани самок в 10 раз (Malakhova et al., 2014), а у черноморских мидий (*Mytilus galloprovincialis*) вымет половых продуктов приводил к 2-кратному снижению содержания СОЗ в гонадах вследствие их выведения с яйцеклетками и сперматозоидами (Никонова и др., 2017).

Сравнение концентраций СОЗ с ПДК для пресноводных рыб показало, что для ΣДДТ (300 нг/г сырой массы) ПДК была превышена у быстрянки в реке Бельбек и у серебряного карася в озере. Для ΣПХБ установленные нормы концентрации, которые составляют 2000 нг/г сырой массы, в печени – 5000 нг/г, превышены не были (Технический регламент...).

Сравнение концентраций ПХБ в образцах рыбы из рек Крыма с аналогичными показателями в пресноводных водоемах других регионов Европы показывает, что содержание ПХБ в крымской рыбе близко к уровню наименее загрязненных районов континента. В отличие от ПХБ, содержание ДДТ в рыбах из рек Альма и Бельбек характеризуется умеренно-высокой степенью загрязнения, занимая промежуточное положение между низким уровнем в Болгарии и высокими значениями в Испании и Польше (Таблица 4).

Расчеты RQ выявили существенные различия в значения экологического риска между видами. Особенно тревожная ситуация сложилась с популяцией травяной креветки, для которой максимальный экологический риск превышал критические значения в десятки раз. Наибольшие значения получены для гексахлорбифенилов 138 (RQ = 2-93) и 153 (RQ = 3-56).

Анализ коэффициентов экологического риска для ихтиофауны выявил региональные различия. Превышения безопасных значений RQ обнаружены у двух видов: быстрянки в реке Бельбек (RQ = 3,7) и серебряного карася в озере в нижнем течении р. Альма (RQ = 3,7). Для голавля и бычка-песочника в Альме риск от загрязнения ДДЭ оказался в пределах среднего риска (RQ = 0,1–0,5).

В ходе исследований отмечен давний экотоксикологический парадокс, когда гидробионты, с одной стороны, эффективно очищают водную среду от гидрофобных СОЗ,

Таблица 4. Содержание ДДТ, его метаболитов и ПХБ (нг/г сырой массы) в рыбе из загрязненных и “фоновых” речных районов Европы

Объект	Годы исследования	Район исследования	ДДТ, нг/г	ΣПХБ, нг/г	Ссылка	Комментарий
Голавль <i>Leuciscus cephalus</i> (мышцы)	2001	Озеро Изео Италия	- ¹	105,9 – 786,4	(Binelli and Provini, 2003)	н.д. ²
Усач <i>Barbus bocagei</i> (мышцы)	2002	Река Синка, Испания	н.обн. ³	-	(Lacorte et al., 2006)	Выше завода по производству дикофола
	2003		616 нг/г ⁴ (Σ6ДДТ)			Рядом с действующим заводом по производству дикофола
12 видов пресноводных рыб (мышцы)	2003	Река Дром, Франция	-	7,8-56,9	(Mazet et al., 2005)	н.д.
Плотва <i>Rutilus rutilus</i> (целая рыба)	2011	Река Ли в Уитхэмпстеде, Великобритания	88 ± 70 нг/г ¹ (Σ6ДДТ ⁵)	-	(Jürgens et al., 2016)	Недалеко расположен бывший завод ДДТ, который был закрыт в 1982 г.
Лещ <i>Abramis brama</i> (мышцы)	2011-2012	Река Висла Краков, Польша	654 (Σ6ДДТ)	-	(Niewiadowska et al., 2014)	н.д.
Серебряный карась <i>Carassius gibelio</i>	2014	Озера Бургас и Мандра, Болгария	3,99 (Σ3ДДТ ⁶)	1,6 (Σ15ПХБ ⁷)	(Georgieva et al., 2015)	н.д.
Европейский угорь <i>Anguilla anguilla</i> (мышцы)	2020	Река Раша, Хорватия	4,97–17,3 (Σ3ДДТ)	2,31–32,8 (Σ7ПХБ ⁸)	(Kljaković-Gašpić et al., 2023)	н.д.
3 вида рыб (целиком)	2024	Реки Альма и Бельбек, Крым, Россия	31,4-360,8 (Σ3ДДТ)	1,3-7,7 (Σ6ПХБ ⁹)	Данное исследование	н.д.

Примечание: ¹ – не определяли, ² – нет данных, ³ – не обнаружено, ⁴ – переведено из мкг/кг, как указано в первоисточнике, ⁵ – сумма концентрации о,п'-ДДТ, п,п'-ДДТ, о,п'-ДДЕ, п,п'-ДДЕ, о,п'-ДДД, п,п'-ДДД, ⁶ – сумма концентрации п,п'-ДДТ, п,п'-ДДЕ, п,п'-ДДД, ⁷ – сумма концентрации пятнадцати конгенов ПХБ, ⁸ – сумма концентрации семи индикаторных конгенов ПХБ (№28, 52, 101, 118, 138, 153 и 180), ⁹ – сумма концентрации шести индикаторных конгенов ПХБ (№28, 52, 101, 138, 153 и 180).

выступая в роли природных биофильтров, а с другой - становятся жертвами хронической интоксикации при длительном нахождении СОЗ в организмах. Поэтому полученные результаты свидетельствуют о необходимости разработки мер по мониторингу критически загрязненных участков, идентификации основных источников поступления СОЗ в эти районы и предотвращения дальнейшего загрязнения экосистем малых рек этими опасными загрязнителями.

Таким образом, несмотря на локальные превышения установленных норм содержания стойких органических загрязнителей (СОЗ) в отдельных видах рыб, общее состояние водоемов Крыма относительно стабильно.

5. Заключение

Эта работа является первой, в которой оценены уровни ДДТ и ПХБ в гидробионтах таких малых крымских рек Альма, Бельбек и Чёрная, в северном понтийском регионе, что расширяет современное понимание пространственного распределения и потенциальных рисков, связанных с влиянием стойких органических загрязнителей в Восточной Европе. Рыба в реках Альма, Бельбек и креветки в р. Черная загрязнены ДДЭ, устойчивым метаболитом ДДТ, что свидетельствует о давнем

загрязнении. Концентрации ДДЕ превышали предельно допустимые концентрации в быстрянке в р. Бельбек и серебряном карасе в озере в нижнем течении р. Альма. ПХБ в тканях рыб либо не были обнаружены, либо определены в следовых количествах, что указывает на отсутствие крупных промышленных источников загрязнения, в то время как сельскохозяйственное загрязнение в этих реках остается значительным. Эти результаты подчеркивают необходимость постоянного мониторинга и принятия мер по снижению поступления токсикантов в реки.

В р. Черная в тканях креветок наблюдались различия в накоплении СОЗ: икра содержала в 10-20 раз более высокие уровни загрязняющих веществ, чем мышечная ткань, что свидетельствует о трансгенерационной передаче СОЗ. В органах травяной креветки определен высокий экологический риск от воздействия накопленных конгенов ПХБ 138 и 153.

Таким образом, исследование содержания СОЗ в гидробионтах выступает важным инструментом для оценки экологического состояния малых рек Крыма в отношении загрязненности этими токсикантами, в условиях, когда в воде этих водоемов концентрация часто оказывается ниже предела обнаружения аналитического метода.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемотропических процессов в экосистемах водоемов Азово-Черноморского бассейна в сравнении с другими акваториями Мирового океана и отдельными водными экосистемами их водосборных бассейнов для обеспечения устойчивого развития на южных морях России» (№124030100127-7), «Биоразнообразие как основа устойчивого функционирования морских экосистем, критерии и научные принципы его сохранения» (№124022400148-4) и «Изучение особенностей структуры и динамики пресноводных экосистем Северного Причерноморья» (№123101900019-5).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Галиулин Р.В., Галиулина Р.А., Хоробрых Р.Р. и др. 2019. Риск современного загрязнения речных вод пестицидами ДДТ и ГХЦГ. Вопросы анализа риска 16(5): 62-69. DOI: [10.32686/1812-5220-2019-16-5-62-69](https://doi.org/10.32686/1812-5220-2019-16-5-62-69)
- Дубровин И.Р., Дубровин Е.Р. 2017. К вопросу экологической безопасности Автономной Республики Крым. Технические и технологические проблемы обслуживания 4(42): 24-28.
- Малахова Л.В., Егоров В.Н., Малахова Т.В. и др. 2020. Содержание хлорорганических соединений в компонентах экосистемы реки Чёрная и оценка их поступления в Севастопольскую бухту в зимний период 2020 года. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований 5: 7-14. DOI: [10.17513/mjpf.13061](https://doi.org/10.17513/mjpf.13061)
- Никонова Л.Л., Малахова Л.В., Нехорошев М.В. и др. 2017. Хлорорганические соединения в гонадах и гаметах двусторчатого моллюска *Mytilus galloprovincialis* Lam., культивируемого у берегов Крыма (Чёрное море). Вода: химия и экология 3: 40-45.
- Технический регламент Таможенного союза «О безопасности пищевой продукции» (ТР ТС - 021 - 2011). 2011. Электронный ресурс. URL: <https://www.gost.ru/portal/gost/home/standarts/technicalregulationses> (доступ 13.07.2025).
- Binelli A., Provini A. 2003. The PCB pollution of Lake Iseo (N. Italy) and the role of biomagnification in the pelagic food web. Chemosphere 53: 143-151. DOI: [10.1016/S0045-6535\(03\)00441-7](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00441-7)
- Ejaz S., Akram W., Lim C.W. et al. 2004. Endocrine disrupting pesticides: a leading cause of cancer among rural people in Pakistan. Experimental oncology 26: 98-105. PMID: 15273660
- Georgieva S., Stancheva M., Makedonski L. 2015. Persistent organochlorine compounds (PCBs, DDTs, HCB & HBDE) in wild fish from the Lake Burgas and Lake Mandra, Bulgaria. Journal of International Scientific Publications 9: 515-523.
- Jürgens M.D., Crosse J., Hamilton P.B. et al. 2016. The long shadow of our chemical past—high DDT concentrations in fish near a former agrochemicals factory in England. Chemosphere 162: 333-344. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2016.07.078](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.07.078)
- Kljaković-Gašpić Z., Dvorščak M., Orct T. et al. 2023. Metal (loid) s and persistent organic pollutants in yellow European eel from the Raša River, Croatia. Marine pollution bulletin 187: 114527. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2022.114527](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114527)
- Lacorte S., Raldúa D., Martínez E. et al. 2006. Pilot survey of a broad range of priority pollutants in sediment and fish from the Ebro river basin (NE Spain). Pilot survey of a broad range of priority pollutants in sediment and fish from the Ebro river basin (NE Spain). Environmental Pollution 140: 471-482. DOI: [10.1016/j.envpol.2005.08.008](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.08.008)
- Lin X., Xu J., Keller A.A. et al. 2020. Occurrence and risk assessment of emerging contaminants in a water reclamation and ecological reuse project. Science of the Total Environment 744: 140977. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.140977](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140977)
- Malakhova L., Giragosov V., Khanaychenko A. et al. 2014. Partitioning and level of organochlorine compounds in the tissues of the Black Sea Turbot at the South-Western Shelf of Crimea. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 14(5): 993-1000.
- Malakhova L.V., Karpova E.P., Belogurova R.E. et al. 2023. Organochlorine xenobiotics in the Salgir River ecosystem: content, distribution, ecological risk. Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea 4: 116-133.
- Mazet A., Keck G., Berny P. 2005. Concentrations of PCBs, organochlorine pesticides and heavy metals (lead, cadmium, and copper) in fish from the Drôme River: potential effects on otters (*Lutra lutra*). Chemosphere 61(6): 810-816. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2005.04.056](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.04.056)
- Niewiadowska A., Kiljanek T., Semeniuk S. et al. 2014. Contamination of omnivorous freshwater fish species and sediments by chlorinated hydrocarbons in Poland. Journal of Veterinary Research 58(3): 405-411.
- Robaire B., Delbes G., Head J.A. et al. 2022. A cross-species comparative approach to assessing multi- and transgenerational effects of endocrine disrupting chemicals. Environmental Research 204: 112063. DOI: [10.1016/j.envres.2021.112063](https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112063)
- Toxicology data were retrieved from the ECOTOX Knowledgebase. 2025. Online resource. URL: <https://cfpub.epa.gov/ecotox/search.cfm> (accessed 09.04.2025)