

# Persistent organochlorine pollutants in the water ecosystems on the coast of the Kandalaksha Gulf of the White Sea



Kolpakova E.S.\* , Velyamidova A.V.<sup>id</sup> , Korobitsyna R.D.

*N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Nikolsky Av., 20, Arkhangelsk, 163020, Russia*

**ABSTRACT.** The paper presents the results of studying selected persistent organochlorine pollutants (hexachlorobenzene, pentachlorobenzene, pentachlorophenol, and pentachloroanisole) from bottom sediments of small stratified lakes at different stages of isolation from the White Sea, unaffected by anthropogenic impact. The sediment samples were collected at deep-sea stations by employees of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk) during complex expeditionary work in March 2019. Persistent organochlorine pollutants were extracted from air-dry samples by accelerated liquid flow extraction with a hot mixture of organic solvents with further preparation according to RD 52.24.417-2011 (RF) and ISO 14154:2005. Identification and quantitative determination of individual compounds were performed using capillary gas chromatography with electron capture detection. The presence of selected persistent organochlorine pollutants in the sediments was revealed. Their total content ranged from 9.7 to 63.6 ng g<sup>-1</sup>, with hexachlorobenzene and pentachlorophenol being found in the highest concentrations. The concentrations of the pollutants were generally assessed as not high by the Norwegian Quality Standards. The input of persistent organochlorine pollutants into the bottom sediments of the studied lakes is presumably associated with long-range transport from various sources located in low/temperate latitudes and nearby regions.

**Keywords:** small stratified lakes, bottom sediments, White Sea, persistent organochlorine pollutants, gas chromatography

**For citation:** Kolpakova E.S., Velyamidova A.V., Korobitsyna R.D. Persistent organochlorine pollutants in the water ecosystems on the coast of the Kandalaksha Gulf of the White Sea // *Limnology and Freshwater Biology*. 2025. - № 4. - P. 635-643. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-635

## 1. Introduction

Specific features of the natural ecosystems of the Arctic and Subarctic are their low resistance to external factors and extremely slow recovery rate. The anthropogenic impact on these territories is constantly increasing: oil and gas production on the Arctic Ocean shelf is expanding, sea traffic along the Northern Sea Route is intensifying, etc. At the same time, emission sources of organochlorine compounds, primarily persistent organic pollutants (POPs), still pose a particular risk (Stockholm, 2024). The hazards of these pollutants is due to their persistence in natural environments, high lipophilicity, bioavailability, biomagnification, and multifaceted toxic effects on living organisms. Moreover, POPs pose a risk to human health and other living organisms not only in the places of their formation and/or use, and input into the environment. These

compounds of varying degrees of volatility and lipophilicity are capable of local, regional and transboundary transfer by various ways (with atmospheric and sea currents, migrating species of living organisms) to high-latitude regions, like Arctic and Subarctic, significantly remote from the emission sources (Wania and Mackay, 1995; AMAP, 2015). It is believed that the negative effect of POPs on biota and humans in the Arctic and Subarctic is stronger than in low latitudes (Wania, 2003). Here, in severe climate, they accumulate ("preservation") in components of terrestrial and aquatic ecosystems (e.g., soils, bottom sediments, snowcover, and ice) and biomagnification.

Based on the results of previously conducted complex research of waterbodies in the North-West of Russia (in particular, lakes of the middle taiga subzone, lakes of Vaigach Island, and waterbodies in the territory of the Bolshezemelskaya and Malozemelskaya Tundras,

\*Corresponding author.

E-mail address: [kolpelen@yandex.ru](mailto:kolpelen@yandex.ru) (E.S. Kolpakova)

**Received:** June 02, 2025; **Accepted:** August 06, 2025;

**Available online:** August 31, 2025

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



etc.), various organochlorine compounds, including persistent organochlorine pollutants, were revealed in bottom sediments (Kolpakova and Velyamidova, 2020; Troyanskaya and Velyamidova, 2017; Kokryatskaya et al., 2023; Velyamidova and Kolpakova, 2020). It is shown that due to the of natural and climatic factors and peculiarities, and the remoteness of the study areas from direct sources of anthropogenic impact, the behavior (levels and distribution) of these compounds in water ecosystems has its own specifics.

Less studied in this context are the waterbodies located on the coast of the Kandalaksha Gulf of the White Sea. Their specific feature is the connection with the White sea in the past and/or present; they are former sea bays which have separated and isolated from the sea to varying degrees as a result of gradual glacio-isostatic and neotectonic land uplift, and displacement of the coastline (Romanenko and Shilova, 2012). In such waterbodies, unique hydrological and hydrochemical regimes are formed, due to their morphometric characteristics, water exchange features, and the ratio of incoming volumes of fresh and sea waters (Losyuk et al., 2023). And since the waterbodies are located at the latitude of the Arctic Circle, all biogeochemical processes occurring in water column are subject to strict seasonal variability (Savvichev et al., 2022).

In this regard, such coastal waterbodies at different stages of isolation from the White Sea are of interest for studying the behavior of organochlorine compounds, including those from the group of persistent organic pollutants.

## 2. Materials and methods

The objects of study were the following coastal waterbodies: Lakes Bol'shiye Khruslomeny, Kislo-Sladkoe, and Trekhtsvetnoye Lakes. Trekhtsvetnoye and Bol'shiye Khruslomeny Lakes are meromictic waterbodies with a constant seawater influx through permeable layers of rocks (Savvichev et al., 2020; Losyuk et al., 2023) and have clearly expressed stratification. In Kislo-Sladkoe Lake, seawater penetrates through a rocky threshold during big spring tides and storm surges. In terms of surface area, the studied lakes are very small (their areas vary from 0.016 to 0.33 km<sup>2</sup>) (Ivanov, 1948). The maximum depth of Kislo-Sladkoe Lake is 4.7 m, Trekhtsvetnoe Lake is 7.5 m, and Bol'shiye Khruslomeny Lake is 18 m.

The sediment samples were collected at deep-sea stations by employees of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Arkhangelsk) during complex expeditionary work in March 2019.

To extract the selected individual POPs (hexachlorobenzene (HCB), pentachlorobenzene (PeCB), pentachlorophenol (PCP), and pentachloroanisole (PCA)) from air-dry sediment samples, the method of accelerated liquid flow extraction with a hot mixture of organic solvents was used. Further sample preparation was carried out in accordance with RD 52.24.417-2011 (RF) and ISO 14154:2005. Identification and quantitative determination of these POPs were performed using

capillary gas chromatography with electron-capture detection (Crystal 5000 GC, Chromatec, RF). The lower limit of detection of individual POPs is 0.1 ng g<sup>-1</sup> of air-dry sample.

Determination of polychlorinated dioxins-*p*-dioxins and dibenzofurans (PCDDs/PCDFs) was performed in the accredited analytical laboratory LLC "Laboratoria", St. Petersburg (Unique accreditation record number in the register of accredited parties No. RA.RU.21AK94) in accordance with PND F 16.1:2:2.2:3.56-08 (RF). Identification and quantitative determination of PCDDs/PCDFs were carried out by high-performance capillary gas chromatography in combination with mass spectrometry (Agilent 7890B GC, Agilent 7000 MS, USA). The range of determined mass concentrations of PCDDs/PCDFs varied from 1.0 to 1000 ng kg<sup>-1</sup> of air-dry sample.

## 3. Results and discussion

Total concentrations of persistent organochlorine pollutants (HCB, PeCB, PCP, and PCA) in bottom sediments of the studied lakes varied from 9.7 to 63.6 ng g<sup>-1</sup>. The identified POPs were arranged on the basis of their decreasing concentrations in the following order: HCB ~ PCP > PeCB > PCA. The predominant HCB was determined in the range from 5.9 to 41.3 ng g<sup>-1</sup>, PCP concentrations were comparable with those of HCB – from 3.0 to 37.3 ng g<sup>-1</sup>, PeCB concentrations did not exceed 2.7 ng g<sup>-1</sup>, and PCA concentrations were very insignificant (no more than 0.4 ng g<sup>-1</sup>) (Fig. 1).

According to the Norwegian Quality Standards for water, sediment and biota (Pettersen, 2016), the concentrations of HCB, PeCB, and PCP detected in lake sediments were mostly low (in 2/3 of the sediment samples), and did not exceed average values in the remaining 1/3 of the sediment samples. There is currently no regulatory framework for the content of PCA in bottom sediments and soils.

It is known that bottom sediments are considered an important source of information on the climatic, geochemical, and ecological conditions that existed in the waterbody itself and in its catchment area (Dauvalter,

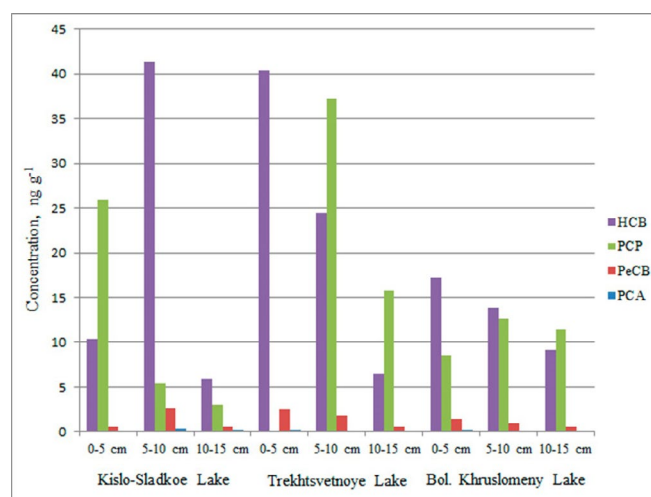


Fig.1. – Distribution of selected POPs in sediments of the studied lakes.

2005). Sediments accumulate data on the flows of elements in the biosphere and are natural deposit matrices not only for natural compounds, but also for various technogenic elements and pollutants (Dauvalter, 2012; Sabatier et al., 2022). When pollutants penetrate into a waterbody, they can accumulate in hydrobionts, increasing their concentration and toxicity in the environment, and also be sorbed by organic matter particles in suspension and bottom sediments with subsequent "preservation". The intensity of these processes is specific to each waterbody and is determined by its morphometric and hydrological characteristics, as well as the hydrochemical characteristics of the water column.

At the same time, under certain conditions leading to a change in the hydrodynamic situation, composition and properties of water and other factors, bottom sediments can become a source of secondary pollution of water masses. At the same time, low temperatures for most of the year and the specific conditions developing in northern aquatic ecosystems contribute to the accumulation and long-term "preservation" of pollutants in sediments, the behavior of which is also determined by the properties of the depositing matrix itself. As expected, for all the studied lakes there was a certain tendency for pollutants to accumulate in the upper sediment layers, represented by finely dispersed aleurite-pelitic and pelite-aleuritic silts enriched with organic matter.

It should be noted that Bol'shiye Khruslomeny, Kislo-Sladkoe, and Trekhtsvetnoye Lakes are remoted from sources of direct anthropogenic impact, therefore the input of the POPs into lake sediments is most likely associated with their transboundary transport from various sources located in low/temperate latitudes and nearby regions. Currently, the main globally active sources of persistent organochlorine pollutants are considered to be the combustion/burning processes of various types of organic raw materials and waste (household and industrial waste, biomass, all types of fuel), as well as production and consumption waste from past economic activities (Stockholm, 2024).

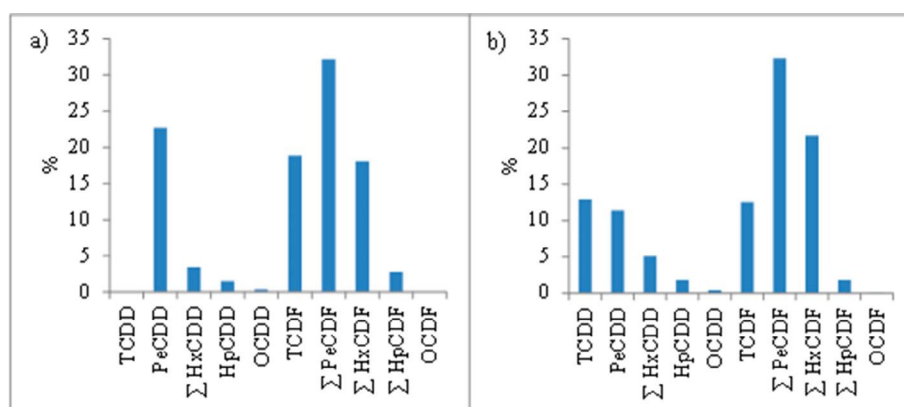
For comparison, we can also provide data on the content of individual POPs in the bottom sediments of the Mogilnoe Lake, another representative of marine meromictic waterbodies beyond the Arctic Circle (Kildin Island, Barents Sea) (Kokryatskaya et al., 2025).

This lake is a remnant of a bay that was isolated from the sea by a rocky barrier at half thousand years ago, but still maintains an underground connection with the sea. Quite high concentrations of pollutants were found in the lake sediments: HCB – from 30.8 to 346.5 ng g<sup>-1</sup>, PeCB – from 2.2 to 39.6 ng g<sup>-1</sup>, PCP – from 3 to 89.7 ng g<sup>-1</sup>, and PCA – from 0.1 to 1.1 ng g<sup>-1</sup>, formed under the additive influence of local anthropogenic emission sources and transboundary transfer. This is confirmed by the identified PCDDs/PCDFs profiles, which reflect the input of pollutants from different sources over decades (Fig. 2).

With a low overall level of dioxin contamination (concentrations did not exceed 2.4 pg WHO-TEQ<sub>2005</sub> g<sup>-1</sup> (SanPiN 1.2.3685-21), the homologous profiles were found to be similar. The dominance of TCDF, PeCDFs, and HxCDFs indicates emission sources associated with thermal processes (e.g. combustion of wood, coal, oil products, household waste, garbage, accidental fires, etc.) (Kanan and Samara, 2018; Kudryavtseva et al., 2021). The presence of TCDD and PeCDDs indicates a mixed pollution profile, both anthropogenic (formation as a result of thermal processes, input with household waste, possible use of contaminated chlorine-containing commercial products, etc.) and natural (wildland fires) (Gullett and Touati, 2003; Kim et al., 2003; Kirkok et al., 2020).

#### 4. Conclusions

Organochlorine pollutants were determined in the sediments of the small stratified lakes, which are to varying degrees isolated from the White Sea and do not experience direct anthropogenic impact. The input of the POPs into the lake sediments is most likely associated with long-range transport from various sources in low/temperate latitudes and nearby regions. HCB and PCP were found in the highest concentrations in all sediment samples, while PeCB and PCA were found in concentrations an order of magnitude lower. In general, the concentrations of the pollutants in the sediments were not high. At the same time, low temperatures for most of the year and the specific conditions that develop in waterbodies of northern territories contribute to the accumulation and long-term "preservation" of pollutants.



**Fig. 2.** – Normalized homologue profiles of PCDDs/PCDFs (in WHO-TEQ<sub>2005</sub>): a) in bottom sediments at the deep-water station, b) in soil within the catchment area.

## Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

## References

- AMAP Assessment. 2015. Temporal trends in persistent organic pollutants in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo.
- Dauvalter V.A. 2005. Bottom sediments of lakes - a source of information on modern and past environmental conditions. In: Proceedings of the conference of scientific societies dedicated to the 75th anniversary of the KSC RAS and the World Science Day for Peace and Development. Apatity, pp. 124. (in Russian)
- Dauvalter V.A. 2012. Geocology of bottom sediments of lakes. Murmansk: Publishing House of Murmansk State Technical University. (in Russian)
- Gullett B., Touati A. 2003. PCDD/F Emissions From Forest Fire Simulations. *Atmospheric Environment* 37: 803–813. DOI: [10.1016/S1352-2310\(02\)00951-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00951-2)
- Ivanov N.N. 1948. Landscape and climatic zones of the Earth. Moscow, Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR. (in Russian)
- Kanan S., Samara F. 2018. Dioxins and furans: A review from chemical and environmental perspectives. *Trends in Environmental Analytical Chemistry* 17: 1–13. DOI: [10.1016/j.teac.2017.12.001](https://doi.org/10.1016/j.teac.2017.12.001)
- Kim E.J., Oh J.E., Chang Y.S. 2003. Effects of forest fire on the level and distribution of PCDD/Fs and PAHs in soil. *Sci Total Environ* 311(1–3):177–189. DOI: [10.1016/S0048-9697\(03\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00095-0)
- Kirkok S.K., Kibet J.K., Kinyanjui T.K. et al. 2020. A review of persistent organic pollutants: dioxins, furans, and their associated nitrogenated analogues. *SN Applied Sciences* 2(10): 1–20. DOI: [10.1007/s42452-020-03551-y](https://doi.org/10.1007/s42452-020-03551-y)
- Kolpakova E.S., Velyamidova A.V. 2020. Organochlorine compounds in subarctic small lakes. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Problems of the Arctic and Antarctic]* 66(2): 180–197. DOI: [10.30758/0555-2648-2020-66-2-180-197](https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-180-197) (in Russian)
- Kokryatskaya N.M., Kolpakova E.S., Titova K.V. et al. 2023. Sulfur and chlorine compounds in water bodies of the Pymvashor subarctic hydrothermal system. *Environmental Science and Pollution Research* 30: 27328–27339. DOI: [10.1007/s11356-022-24141-y](https://doi.org/10.1007/s11356-022-24141-y)
- Kokryatskaya N.M., Losyuk G.N., Kolpakova E.S. et al. 2025. Current Ecosystem Status of the Anchialine Meromictic Lake Mogilnoe (Kildin Island, Barents Sea). *Oceanology* 65(2): 236–249. DOI: [10.1134/S0001437024701091](https://doi.org/10.1134/S0001437024701091)
- Kudryavtseva A.D., Mir-Kadyrova E.Ya., Kalinkevich G.A. et al. 2021. The nature of soil contamination with dioxins near solid municipal waste disposal sites. *Pochvoveden'e [Soil Science]* 8: 957–968. DOI: [10.31857/S0032180X21080128](https://doi.org/10.31857/S0032180X21080128) (in Russian)
- Losyuk G.N., Kokryatskaya N.M., Vakhrameyeva E.A. et al. 2023. Reduced sulfur compounds in bottom sediments of lakes at different stages of separation from Kandalaksha Bay of the White Sea (meromictic Lake Trekhtsvetnoe). *Oceanology* 63(5): 683–692. DOI: [10.1134/S0001437023050065](https://doi.org/10.1134/S0001437023050065)
- Pettersen R. 2016. Grenseverdi for klassifisering av vann, sediment og biota. Miljødirektoratet basert på bakgrunnsdata fra Aquateam. (in Norwegian)
- Romanenko F.A., Shilova O.S. 2012. Postglacial uplift of the Karelian coast of the White Sea according to data of radiocarbon and diatom analyses of lake and bog deposits of Kindo Peninsula. Reports of the Academy of Sciences. *Doklady Akademii nauk. Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe uchrezhdenie «Rossijskaya akademiya nauk» [Federal State Budgetary Institution "Russian Academy of Sciences"]* 442(4): 544. (in Russian)
- Sabatier P., Moernaut J., Bertrand S. et al. 2022. A Review of Event Deposits in Lake Sediments. *Quaternary* 5(3): 34. DOI: [10.3390/quat5030034](https://doi.org/10.3390/quat5030034)
- SanPiN 1.2.3685-21. 2021. Hygiene Practices, Environmental Factors Safety and Security for Humans (as amended on December 30, 2022). Resolution of the Russia's Chief Public Health Officer "On approval of sanitary rules and regulations SanPiN 1.2.3685-21" dated 01/28/21. (in Russian)
- Savvichev A.S., Kadnikov V.V., Rusanov I.I. et al. 2020. Microbial Processes and Microbial Communities in the Water Column of the Polar Meromictic Lake Bol'shie Khruslomeny at the White Sea Coast. *Frontiers in microbiology* 11:1945. DOI: [10.3389/fmicb.2020.01945](https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01945)
- Savvichev A.S., Kulakova A.A., Krasnova E.D. et al. 2022. Microbial Community of a Marine Meromictic Trough (Biofilter Bay) in the Kandalaksha Bay, White Sea. *Microbiology* 91(4): 432–444. DOI: [10.1134/s0026261722100940](https://doi.org/10.1134/s0026261722100940)
- Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs). 2024. URL: <https://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx> (date of access: 20.09.2024)
- Troyanskaya A.F., Velyamidova A.V. 2017. Persistent organic pollutants in subarctic lakes in the extreme North of European Russia. *Water Resources* 44(4): 635–644. DOI: [10.1134/S0097807817040170](https://doi.org/10.1134/S0097807817040170)
- Velyamidova A.V., Kolpakova E.S. 2020. Organochlorine compounds in sediment core of subarctic small lake. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 894–895. DOI: [10.31951/2658-3518-2020-A-4-894](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-894)
- Wania F., Mackay D. 1995. A global distribution model for persistent organic chemicals. *Science of the Total Environment* 160: 211–232.
- Wania F. 2003. Assessing the potential of persistent organic chemicals for long-range transport and accumulation in polar region. *Environ. Sci. Technol* 37(7): 1344–1351. DOI: [10.1021/es026019e](https://doi.org/10.1021/es026019e)

# Стойкие хлорорганические загрязнители в водных экосистемах на побережье Кандалакшского залива Белого моря

Краткое сообщение

LIMNOLOGY  
FRESHWATER  
BIOLOGYКолпакова Е.С.\* , Вельямидова А.В.  , Коробицына Р.Д.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, г. Архангельск, пр. Никольский, д. 20, 163020, Россия

**АННОТАЦИЯ.** В работе представлены результаты изучения некоторых стойких хлорорганических загрязнителей (гексахлорбензола, пентахлорбензола, пентахлорфенола и пентахлоранизола) в донных осадках малых стратифицированных озер на разной стадии отделения от Белого моря, не испытывающих антропогенного воздействия. Пробы озерных осадков отобраны на глубоководных станциях в ходе комплексных экспедиционных работ в марте 2019 года сотрудниками Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук (город Архангельск). Извлечение стойких хлорорганических загрязнителей из воздушно-сухих проб донных осадков проводили методом ускоренной жидкостной проточной экстракции горячей смесью органических растворителей с дальнейшей подготовкой согласно РД 52.24.417-2011 и ISO 14154:2005. Идентификацию и количественное определение индивидуальных соединений проводили методом капиллярной газовой хроматографии с электрозахватным детектированием. Выявлено присутствие в осадках стойких хлорорганических загрязнителей, суммарное содержание которых составляло от 9,7 до 63,6 нг/г, при этом в наибольших концентрациях определены гексахлорбензол и пентахлорфенол. Концентрации выявленных загрязнителей оценивались в целом как не высокие, относительно норвежских стандартов. Поступление стойких хлорорганических загрязнителей в донные осадки исследованных озер, предположительно, связано с дальним переносом от различных источников, расположенных в низких/умеренных широтах и близлежащих регионах.

**Ключевые слова:** малые стратифицированные озера, донные осадки, Белое море, стойкие хлорорганические загрязнители, газовая хроматография

**Для цитирования:** Колпакова Е.С., Вельямидова А.В., Коробицына Р.Д. Стойкие хлорорганические загрязнители в водных экосистемах на побережье Кандалакшского залива Белого моря // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 635-643. DOI: [10.31951/2658-3518-2025-A-4-635](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-4-635)

## 1. Введение

Специфическими особенностями природных экосистем Арктики и Субарктики является их низкая устойчивость к воздействию внешних факторов и крайне медленная скорость восстановления. Техногенная нагрузка на эти территории постоянно возрастает: расширяется нефте- и газодобыча на шельфе Северного Ледовитого океана, активизируется транспортный поток по Северному морскому пути и т.д. При этом особую угрозу по-прежнему несут источники эмиссии хлорорганических соединений, в первую очередь относящихся к стойким органическим загрязнителям (СОЗ) (Stockholm, 2024). Опасность этих соединений связана с их

устойчивостью к разложению в природных средах, высокой липофильностью, биоаккумуляционной способностью и многоплановым токсичным воздействием на живые организмы. Причем СОЗ представляют опасность для здоровья человека и других живых организмов не только в местах своего использования и/или образования и поступления в окружающую среду. Эти соединения разной степени летучести и липофильности способны к локальному, региональному и трансграничному переносу различными путями (с атмосферными потоками, морскими течениями, мигрирующими видами живых организмов) в высокоширотные арктические и субарктические районы, значительно удаленные от первоначальных источников (Wania and Mackay,

\*Автор для переписки.

Адрес e-mail: [kolpelen@yandex.ru](mailto:kolpelen@yandex.ru) (Е.С. Колпакова)

**Поступила:** 02 июня 2025; **Принята:** 06 августа 2025;

**Опубликована online:** 31 августа 2025

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



1995; AMAP, 2015). Считается, что негативное воздействие CO<sub>2</sub> на биоту и человека в Арктике и Субарктике сильнее, чем в низких широтах (Wania and Mackay, 2003): здесь, в условиях холодного климата, происходит их накопление («консервация») в компонентах наземных и водных экосистем (почвах, донных отложениях, снежном покрове, толще льда) и биоусиление воздействия.

По результатам ранее проведенных комплексных исследований водных объектов Севера-Запада России (в частности, озер среднетаежной подзоны, острова Вайгач, водоемов на территории Большеземельской и Малоземельской тундр и пр.) в донных осадках выявлено присутствие различных хлорорганических соединений, включая стойкие хлорорганические загрязнители (Колпакова и Вельямидова, 2020; Troyanskaya and Velyamidova, 2017; Kokryatskaya et al., 2023; Velyamidova and Kolpakova, 2020). Показано, что ввиду особенностей природно-климатических условий и удаленности районов исследования от прямых источников антропогенного воздействия, поведение (уровни и распределение) этих соединений в условиях водных экосистем имеет свою специфику.

Менее изученными в этом плане являются водоемы, расположенные на побережье Кандалакшского залива Белого моря. Их особенностью является связь с морем в прошлом и/или настоящем – это бывшие морские заливы, отделившиеся и в разной степени изолированные от моря в результате постепенного гляциоизостатического и неотектонического поднятия суши и постепенного перемещения береговой линии (Романенко и Шилова, 2012). В таких водоемах формируется уникальный гидролого-гидрохимический режим, обусловленный морфометрическими характеристиками, особенностями водообмена, соотношением поступающих объемов пресной и морской воды (Losyuk et al., 2023). А поскольку, водоемы расположены на широте Полярного круга, то все протекающие в их водной толще биогеохимические процессы подчинены строгой сезонной изменчивости (Savvichev et al., 2022).

В связи с этим, прибрежные водоемы, находящиеся на разных стадиях отделения от Белого моря, представляют интерес для изучения особенностей поведения хлорорганических соединений, в том числе из группы стойких органических загрязнителей.

## 2. Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны озера Большие Хрусломены, Кисло-Сладкое и Трехцветное. Озера Трехцветное и Большие Хрусломены – меромиктические с постоянным поступлением морских вод через проницаемые породы (Savvichev et al., 2020; Losyuk et al., 2023), имеют четко выраженную стратификацию. В оз. Кисло-Сладкое морская вода поступает через каменистый порог во время сизигийных приливов и штормовых нагонов. По площади акватории иссле-

дованные водоемы относятся к очень малым (площадь озер – от 0,016 до 0,33 км<sup>2</sup>) (Иванов, 1948). Максимальная глубина оз. Кисло-Сладкое составляет 4,7 м, оз. Трехцветное – 7,5 м, оз. Большие Хрусломены – 18 м.

Отбор проб донных осадков проводился сотрудниками лаборатории экоаналитических исследований ФГБУН ФИЦКИА РАН в ходе экспедиционных работ в марте 2019 года. Для извлечения следующих индивидуальных СОЗ: гексахлорбензола (ГХБ), пентахлорбензола (ПeХБ), пентахлорфенола (ПХФ), пентахлоранизола (ПХА), из воздушно-сухих проб донных осадков использовали метод ускоренной жидкостной проточной экстракции горячей смесью органических растворителей. Далее пробоподготовку проводили в соответствии с РД 52.24.417-2011 и ISO 14154:2005. Количественное определение и идентификацию указанных СОЗ проводили методом капиллярной газовой хроматографии с электронозахватным детектированием (ГХ “Кристалл 5000.1”, СКБ “Хроматэк”; Россия). Нижний предел обнаружения индивидуальных соединений – 0,1 нг/г в.с.в.

Определение полихлорированных диоксинов-*n*-диоксинов и дибензофуранов (ПХДД/ПХДФ) выполняли в аккредитованной лаборатории ООО «Лаборатория», г. Санкт-Петербург (Уникальный номер записи об аккредитации в реестре аккредитованных лиц № RA.RU.21AK94) в соответствии с ПНД Ф 16.1:2:2.2:3.56-08. Количественное определение и идентификацию ПХДД/ПХДФ проводили методом высокоэффективной капиллярной газовой хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией (ГХ Agilent 7890B, MS Agilent 7000, США). Диапазон определяемых массовых концентраций ПХДД/ПХДФ – 1,0-1000 нг/кг в.с.в.

## 3. Результаты и обсуждение

Суммарные концентрации стойких хлорорганических загрязнителей (ГХБ, ПeХБ, ПХФ, ПХА) в донных осадках исследованных озер варьировали от 9,7 до 63,6 нг/г. Выявленные СОЗ в порядке убывания их концентраций располагались в следующей последовательности: ГХБ ~ ПХФ > ПeХБ >> ПХА. Преобладающий ГХБ определен в диапазоне от 5,9 до 41,3 нг/г, количества ПХФ в осадках были сопоставимы с таковыми ГХБ – от 3,0 до 37,3 нг/г, концентрации ПeХБ не превышали 2,7 нг/г, и совсем незначительными (не более 0,4 нг/г) были количества ПХА (Рис. 1).

В соответствии с классификацией норвежских стандартов качества донных осадков (Pettersen, 2016) найденных в осадках озер концентрации ГХБ, ПeХБ и ПХФ в большинстве своем (в 2/3 проб) имели низкие значения, а в остальных пробах не превышали средних значений. По содержанию ПХА в донных осадках и почвах нормативная база в настоящее время отсутствует.

Известно, что донные осадки считаются важным источником информации о климатических, геохимических, экологических условиях, суще-

ствовавших в самом водоеме и на его водосборной площади (Даувальтер, 2005). Они накапливают сведения о потоках элементов в биосфере и являются естественными депонирующими матрицами не только для природных соединений, но и для различных техногенных элементов и загрязняющих веществ (Даувальтер, 2012; Sabatier et al., 2022). При попадании в водоем загрязнители способны аккумулироваться в гидробионтах и передаваться по пищевой цепи с увеличением концентрации в каждом последующем звене, а также сорбироваться частицами органического вещества взвеси и донных осадков с последующей «консервацией». Интенсивность этих процессов специфична для каждого водоема и определяется его морфометрическими и гидрологическими характеристиками, а также гидрохимическими особенностями водной толщи.

В то же время, при определенных условиях, приводящих к изменению гидродинамической обстановки, состава и свойств воды и прочих факторов, донные осадки могут стать источником вторичного загрязнения водных масс. При этом низкие температуры на протяжении большей части года и специфичность условий, складывающихся в водных экосистемах Арктики и Субарктики, способствуют накоплению и длительному сохранению в осадках загрязняющих веществ подобно СОЗ, поведение которых, как известно, определяется еще и свойствами собственно депонирующей матрицы. В целом, как и ожидалось, для всех исследованных озер наблюдалась некоторая тенденция к накоплению загрязнителей в верхних слоях донных осадков, представленных тонкодисперсными алевро-пелитовыми/пелито-алевритовыми илами, обогащенными органическими веществом.

Следует отметить, что озера Большие Хрусломены, Кисло-Сладкое и Трехцветное считаются удаленными от источников прямого антропогенного воздействия, поэтому поступление СОЗ в донные осадки, скорее всего, связано с трансграничным переносом от различных источников, расположенных в низких/умеренных широтах и близлежащих регионах. В настоящее время основными глобально действующими источниками хлорорганических загрязнителей считаются процессы сжигания/горения различного вида органического сырья

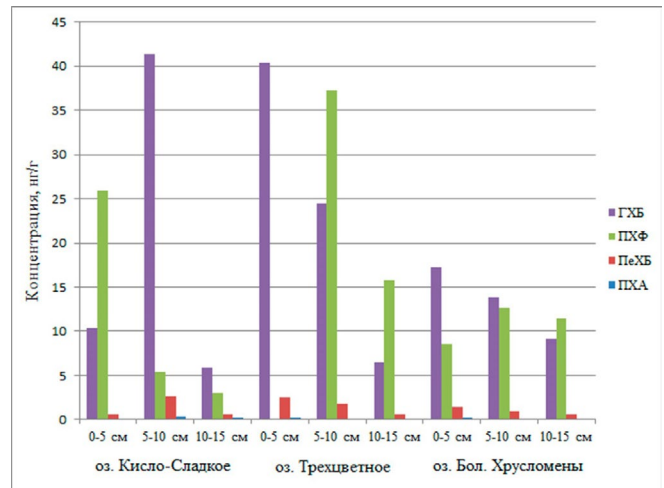


Рис.1. – Распределение СОЗ в донных осадках исследованных озер.

и отходов (бытовых и промышленных отходов, биомассы, всех видов топлива), а также отходы производства и потребления от прошлой хозяйственной деятельности (Stockholm, 2024).

Для сравнения можно также привести данные по содержанию индивидуальных СОЗ в донных осадках малого оз. Могильное, еще одного представителя меромиктических морских водоемов за Полярным кругом (о. Кильдин, Баренцево море) (Kokryatskaya et al., 2025). Озеро является остатком залива, отделившегося от моря около полутора тысяч лет назад каменной перемычкой, но до сих пор сохраняет подземную связь с морем. В осадках этого озера выявлены довольно высокие концентрации загрязнителей: ГХБ – от 30,8 до 346,5 нг/г, ПсХБ – от 2,2 до 39,6 нг/г, ПХФ – от 3 до 89,7 нг/г, ПХА – от 0,1 до 1,1 нг/г, сформированные под аддитивным влиянием антропогенных/техногенных источников локального уровня и трансграничного переноса. Подтверждением этого являются установленные профили ПХДД/ПХДФ, отображающие поступление загрязнителей из разных источников в течение десятилетий (Рис. 2).

При невысоком в целом уровне загрязнения (концентрации ПХДД/ПХДФ не превышали 2,4 пг WHO-TEQ<sub>2005</sub>/г (СанПиН 1.2.3685-21) гомологические профили оказались близки друг к другу. Доминирование ТХДФ, ПсХДФ и ГкХДФ свидетельствует об источниках загрязнения, связанных с тер-

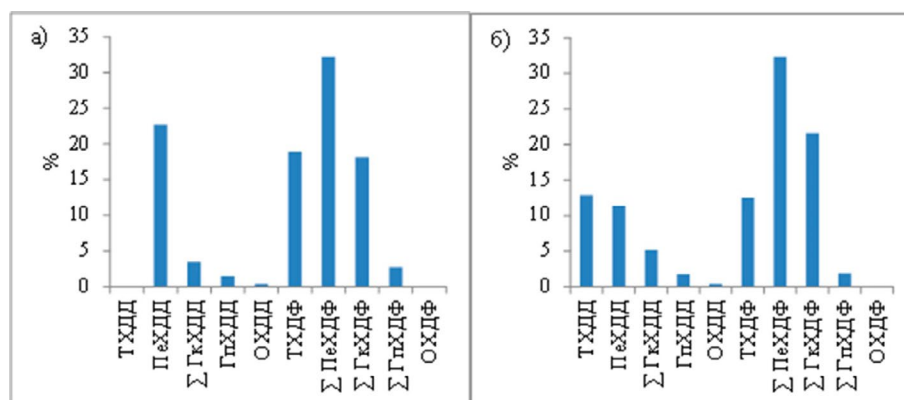


Рис.2. – Нормализованные гомологические профили ПХДД/ПХДФ (в WHO-TEQ<sub>2005</sub>): а) в донных осадках на глубоководной станции, б) в почве на водосборной площади.

мическими процессами (например, сжигание древесины, угля, нефтепродуктов, бытовых отходов, мусора, случайные возгорания и пр.) (Kanan and Samara, 2018; Кудрявцева и др., 2021). Присутствие ТХДД и ПехДД указывает на смешанный профиль загрязнения, как антропогенного (образование в результате термических процессов, поступление с бытовыми отходами, возможное применение загрязненных хлорсодержащих коммерческих продуктов и пр., так и природного характера (природные пожары) (Gullett and Touati, 2003; Kim et al., 2003; Kirkok et al., 2020).

#### 4. Выводы

Таким образом, в донных осадках исследованных малых стратифицированных озер, в разной степени изолированных от Белого моря и не испытывающих прямого антропогенного воздействия, выявлено присутствие стойких хлорорганических загрязнителей. Поступление СОЗ в донные осадки, вероятнее всего, связано с дальним переносом от различных источников в низких/умеренных широтах и близлежащих регионах. В наибольших концентрациях во всех осадках были найдены ГХБ и ПХФ; в концентрациях, на порядок ниже были определены ПехБ и ПХА. В целом, концентрации СОЗ в исследованных осадках были не высокими. В то же время, низкие температуры на протяжении большей части года и специфичность условий, складывающихся в водоемах северных территорий, способствуют накоплению и длительному сохранению загрязнителей.

#### Конфликты интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Список литературы

Даувальтер В.А. 2005. Донные отложения озер - источник информации о современных и прошлых условиях окружающей среды. В: Материалы конференции научных обществ, посвященной 75-летию КНЦ РАН и Всемирному дню науки за мир и развитие. Апатиты, С. 124.

Даувальтер В.А. 2012. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Издательство Мурманского государственного технического университета.

Иванов Н.Н. 1948. Ландшафтно-климатические зоны земного шара. Москва, Ленинград: Издательство Академии наук СССР.

Колпакова Е.С., Вельяминова А.В. 2020. Хлорорганические соединения в субарктических малых озерах. Проблемы Арктики и Антарктики 66(2): 180–197. DOI: [10.30758/0555-2648-2020-66-2-180-197](https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-180-197)

Кудрявцева А.Д., Мир-Кадырова Е.Я., Калинин Г.А. и др. 2021. Характер загрязнения диоксидами почвы вблизи мест захоронения твердых бытовых отходов. Почвоведение 8: 957–968. DOI: [10.31857/S0032180X21080128](https://doi.org/10.31857/S0032180X21080128)

Романенко Ф.А., Шилова О.С. 2012. Последледниковое поднятие Карельского берега Белого моря по данным радиоуглеродного и диатомового анализов озерно-болотных отложений п-ова Киндо. Доклады Академии наук.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российская академия наук» 442(4): 544.

СанПиН 1.2.3685-21. 2021. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания (с изменениями на 30 декабря 2022 года). Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21» от 28.01.21.

AMAP Assessment. 2015. Temporal trends in persistent organic pollutants in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo.

Gullett B., Touati A. 2003. PCDD/F Emissions From Forest Fire Simulations. Atmospheric Environment 37: 803–813. DOI: [10.1016/S1352-2310\(02\)00951-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00951-2)

Kanan S., Samara F. 2018. Dioxins and furans: A review from chemical and environmental perspectives. Trends in Environmental Analytical Chemistry 17: 1–13. DOI: [10.1016/j.teac.2017.12.001](https://doi.org/10.1016/j.teac.2017.12.001)

Kim E.J., Oh J.E., Chang Y.S. 2003. Effects of forest fire on the level and distribution of PCDD/Fs and PAHs in soil. Sci Total Environ 311(1–3):177–189. DOI: [10.1016/S0048-9697\(03\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(03)00095-0)

Kirkok S.K., Kibet J.K., Kinyanjui T.K. et al. 2020. A review of persistent organic pollutants: dioxins, furans, and their associated nitrogenated analogues. SN Applied Sciences 2(10): 1–20. DOI: [10.1007/s42452-020-03551-y](https://doi.org/10.1007/s42452-020-03551-y)

Kokryatskaya N.M., Kolpakova E.S., Titova K.V. et al. 2023. Sulfur and chlorine compounds in water bodies of the Pymvashor subarctic hydrothermal system. Environmental Science and Pollution Research 30: 27328–27339. DOI: [10.1007/s11356-022-24141-y](https://doi.org/10.1007/s11356-022-24141-y)

Kokryatskaya N.M., Losyuk G.N., Kolpakova E.S. et al. 2025. Current Ecosystem Status of the Anchialine Meromictic Lake Mogilnoe (Kildin Island, Barents Sea). Oceanology 65(2): 236–249. DOI: [10.1134/S0001437024701091](https://doi.org/10.1134/S0001437024701091)

Losyuk G.N., Kokryatskaya N.M., Vakhrameyeva E.A. et al. 2023. Reduced sulfur compounds in bottom sediments of lakes at different stages of separation from Kandalaksha Bay of the White Sea (meromictic Lake Trekhtsvetnoe). Oceanology 63(5): 683–692. DOI: [10.1134/S0001437023050065](https://doi.org/10.1134/S0001437023050065)

Pettersen R. 2016. Grenseverdier for klassifisering av vann, sediment og biota. Miljødirektoratet basert på bakgrunnsdata fra Aquateam. (in Norwegian)

Sabatier P., Moernaut J., Bertrand S. et al. 2022. A Review of Event Deposits in Lake Sediments. Quaternary 5(3): 34. DOI: [10.3390/quat5030034](https://doi.org/10.3390/quat5030034)

Savvichev A.S., Kadnikov V.V., Rusanov I.I. et al. 2020. Microbial Processes and Microbial Communities in the Water Column of the Polar Meromictic Lake Bol'shie Khruslomeny at the White Sea Coast. Frontiers in microbiology 11:1945. DOI: [10.3389/fmicb.2020.01945](https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01945)

Savvichev A.S., Kulakova A.A., Krasnova E.D. et al. 2022. Microbial Community of a Marine Meromictic Trough (Biofilter Bay) in the Kandalaksha Bay, White Sea. Microbiology 91(4): 432–444. DOI: [10.1134/s0026261722100940](https://doi.org/10.1134/s0026261722100940)

Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs). 2024. URL: <https://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx> (дата обращения: 20.09.2024)

Troyanskaya A.F., Velyamidova A.V. 2017. Persistent organic pollutants in subarctic lakes in the extreme North of European Russia. Water Resources 44(4): 635–644. DOI: [10.1134/S0097807817040170](https://doi.org/10.1134/S0097807817040170)

Velyamidova A.V., Kolpakova E.S. 2020. Organochlorine compounds in sediment core of subarctic small lake. Limnology and Freshwater Biology 4: 894–895. DOI: [10.31951/2658-3518-2020-A-4-894](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-894)



Wania F., Mackay D. 1995. A global distribution model for persistent organic chemicals. *Science of the Total Environment* 160: 211–232.

Wania F. 2003. Assessing the potential of persistent organic chemicals for long-range transport and accumulation in polar region. *Environ. Sci. Technol* 37(7): 1344–1351. DOI: [10.1021/es026019e](https://doi.org/10.1021/es026019e)