

УДК 502.17

ХЛОРООРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В ВОДЕ ОЗЕР, НАХОДЯЩИХСЯ НА РАЗНОЙ СТАДИИ ОТДЕЛЕНИЯ ОТ БЕЛОГО МОРЯ

Е. С. Колпакова*, **А. В. Вельямидова**, **Т. А. Королева**

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения РАН (пр. Никольский, 20,
Архангельск, Россия, 163020), *kolpelen@yandex.ru*

Представлены данные о содержании и происхождении хлорорганических соединений (хлорфенольных соединений и летучего хлороформа) в водоемах со стратифицированной водной толщей. Проведены рекогносцировочные обследования малых прибрежных озер, расположенных в Кандалакшском заливе Белого моря в районе Беломорской биологической станции имени Н. А. Перцова Биологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова (Лоухский район, Республика Карелия). Объектами исследования выбраны озера, находящиеся на разной стадии отделения от моря: Нижнее Ершовское, Трехцветное и Большие Хрусломены. Выявлено значительное содержание хлорфенольных соединений в воде, главным образом в придонных слоях соленых меромиктических озер (до 49,9 мкг/дм³). Хлорфенольные соединения представлены преимущественно моно- и трихлорфенолами. Концентрации хлороформа составляли от 0,06 до 0,99 мкг/дм³. Установлено, что компонентный состав хлорорганических соединений в воде обследованных озер, не подверженных прямому антропогенному воздействию, обусловлен преимущественно природными источниками их образования. В соленых водах в сильно восстановительных условиях выявлено снижение активности природных процессов хлорирования органического вещества и увеличение продуктивности процессов восстановительного дехлорирования хлорфенольных соединений с участием анаэробных микроорганизмов.

Ключевые слова: хлорфенольные соединения; хлороформ; меромиктические озера; вода; газовая хроматография

Для цитирования: Колпакова Е. С., Вельямидова А. В., Королева Т. А. Хлорорганические соединения в воде озер, находящихся на разной стадии отделения от Белого моря // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 45–52. doi: 10.17076/lim1910

E. S. Kolpakova*, A. V. Velyamidova, T. A. Koroleva. ORGANOCHLORINE COMPOUNDS IN THE WATER OF LAKES AT DIFFERENT STAGES OF ISOLATION FROM THE WHITE SEA

*N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20 Nikolsky Ave., 163020 Arkhangelsk, Russia), * kolpelen@yandex.ru*

The article presents data on the content and origin of organochlorine compounds (chlorophenolic compounds and volatile chloroform) in stratified water bodies. We carried out a reconnaissance survey of small coastal lakes in the Gulf of Kandalaksha, White Sea (Loukhsky District, Republic of Karelia), not far from the White Sea Biological Station of the Faculty of Biology of the Lomonosov Moscow State University. The study objects were lakes Nizhneye Yershovskoye, Tryokhtsvetnoye, and Bol'shie Khruslomeny, which are currently in different phases of isolation from the sea. A significant content of chlorophenolic compounds in water (up to 49.9 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$), mainly in the bottom layers of saline meromictic lakes, was determined. Chlorophenolic compounds were represented mainly by mono- and trichlorophenols. Chloroform concentrations ranged from 0.06 to 0.99 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$. It has been established that the composition of organochlorine compounds in water of the studied lakes, which are not exposed to direct human impact, was primarily determined by natural sources of these compounds. In the highly reduced conditions of saline lake waters there occurred a decrease in the activity of natural processes of organic matter chlorination with a simultaneous increase in the productivity of reductive dechlorination of chlorophenolic compounds involving anaerobic microorganisms.

Keywords: chlorophenolic compounds; chloroform; water; meromictic lakes; gas chromatography

For citation: Kolpakova E. S., Velyamidova A. V., Koroleva T. A. Organochlorine compounds in the water of lakes at different stages of isolation from the White Sea. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 45–52. doi: 10.17076/lim1910

Введение

Одним из важных показателей экологического состояния природных экосистем является присутствие хлорорганических соединений (ХОС), происхождение и накопление которых ранее связывали только с техногенными факторами. В настоящее время довольно широко распространено мнение, что ХОС образуются также и естественным путем – в результате хлорирования органического вещества при взаимодействии с хлорид-ионами и в процессах ферментативного продуцирования [Watts et al., 2004; Gribble, 2010; Field, 2016]. К типичным представителям таких ХОС можно отнести обширную группу хлорфенольных соединений (ХФС) и хлороформ.

ХФС являются ионогенными соединениями с разной степенью гидрофобности, липофильности и кислотности. Одним из крупных биогенных источников этих соединений являются морские экосистемы, где основная роль в их образовании принадлежит бурым и диатомовым водорослям, планктону, цианобактериям и пр.; в пресноводных водоемах активными продуцентами выступают диатомовые, зеленые и сине-зеленые водоросли [Gribble, 2010]. Кроме того, образованию ХФС способствуют про-

цессы дехлорирования высокохлорированных фенолов, протекающие в компонентах окружающей среды под действием анаэробных и аэробных микроорганизмов. При этом продуктами восстановительного дехлорирования являются хлорированные фенолы, а окислительного дехлорирования – метокси- и гидроксихлорфенолы [Field, Sierra-Alvarez, 2007]. Наряду с естественным продуцированием в природных экосистемах протекают и биохимические процессы преобразования ХФС, при этом состав промежуточных и конечных продуктов определяется условиями среды: в анаэробных условиях образуются менее токсичные хлорированные производные, а в аэробных – более токсичные [Field, Sierra-Alvarez, 2007; Field, 2016].

Хлороформ – летучее галогенпроизводное, обладает малой растворимостью в воде и низкой липофильностью, может оказывать негативное воздействие на биоту и человека [Watts et al., 2004]. Хлороформ плохо удерживается, поэтому не накапливается в почве, донных осадках и водной толще, что приводит к значительной эмиссии его в атмосферу. При этом некоторая часть присутствующего в атмосфере хлороформа тем не менее может вымываться дождевыми осадками, поступая на поверхность почвы, а также в водную среду [Watts et al.,

2004]. Считается, что в основном хлороформ поступает в окружающую среду от источников природного происхождения, среди которых наиболее значимым являются почвенные процессы [Watts et al., 2004]. Образование хлороформа в почвах происходит преимущественно в верхних слоях, богатых органическим веществом, в результате ферментативного продуцирования (катализируемого хлорпероксидазой) почвенными организмами, при биогенном хлорировании почвенных кислот (в основном гуминовых веществ), а также при биодеградации и декарбоксилировании трихлоруксусной кислоты, образующейся в поверхностном слое почвы биогенным хлорированием органического вещества. Кроме того, хлороформ может продуцироваться различными насекомыми, растительностью (наземной и пресноводной); также свой вклад в эмиссию хлороформа вносят источники абиотического происхождения [Watts et al., 2004].

Ранее сотрудниками ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН (г. Архангельск) были обследованы водные экосистемы Европейского Севера России с разной степенью развития анаэробных условий, а именно: бореальные озера на юго-западе Архангельской области, малые озера на территориях Большеземельской и Малоземельской тундр, о. Вайгач, а также водоемы субарктического гидротермального урочища Пымвашор [Колпакова, 2018; Колпакова, Вельяминова, 2020; Kokryatskaya et al., 2023]. По результатам проведенных исследований установлены количественное содержание и состав ХОС в воде и донных осадках, показаны специфика распределения, пути их поступления в водоемы, а также особенности продуцирования, трансформации и деструкции, что позволило оценить влияние процессов образования этих соединений на экологическое состояние исследованных водных экосистем в специфических условиях северных территорий.

В данной работе представлены результаты изучения поведения ХОС в водоемах, находящихся на разной стадии естественного отделения от Белого моря.

Материалы и методы

Карельский и Кандалакшский берега Белого моря сильно изрезаны и имеют множество заливов и лагун. В результате изостатического постгляциального поднятия берега небольшие заливы и лагуны отделяются от моря [Краснова и др., 2013]. Специфичной чертой таких водоемов морского происхождения является присутствие в придонных водах сероводорода,

генерируемого в ходе сульфатредукции, который является не только токсическим агентом, но и сильнейшим восстановителем. Он играет роль основного регулятора окислительно-восстановительных условий и влияет на общую направленность и эффективность протекающих в водоеме процессов, в том числе на интенсивность процессов продуцирования, трансформации и деградации ХОС.

В Республике Карелия, в Кандалакшском заливе Белого моря, насчитывается несколько водоемов, утративших связь с морем. Комплексные исследования таких водоемов уже более 10 лет проводятся сотрудниками Беломорской биологической станции имени Н. А. Перцова Биологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова (ББС МГУ) [Краснова, 2017].

Объектами настоящего исследования являются водоемы (малые прибрежные озера с различной степенью стратификации вод и развития анаэробных условий), расположенные недалеко от ББС МГУ: Нижнее Ершовское, Трехцветное и Большие Хрусломены (рис. 1).

Озеро Нижнее Ершовское – одно из двух озер, образовавшихся на месте древнего пролива, соединенное протокой с Верхним Ершовским озером, из которого получает пресную воду. Нижнее Ершовское озеро отделено от Белого моря каменистым барьером, по которому из него вытекает пресный ручей. Поступление небольшого количества воды из моря происходит не чаще, чем раз в год, только во время сильных сизигийных приливов и штормов. Большая часть водной толщи пресная или солоноватая (0,1–0,7 епс). Максимальная глубина озера составляет 2,5 м. Температура в нем меняется по всей водной толще в зависимости от климатического сезона; поскольку глубина озера невелика, летом оно прогревается до дна (до 19 °С). В настоящее время в озерных водах сероводород практически полностью отсутствует [Лосюк и др., 2021].

Озеро Трехцветное считается полностью отделившимся от моря водоемом со стабильной стратифицированной структурой и всеми признаками меромиксии, с максимальной глубиной 7,5 м [Лосюк и др., 2021, 2023]. Озеро получило свое название за разные цвета трех его слоев: верхний слой воды желтоватый из-за поступающих гуминовых веществ со стоком из болота, ниже – слой ярко-зеленого цвета, а придонный слой – мутно-желтая сероводородная вода. Верхний слой воды (до 1 м) является пресным, нижерасположенные воды соленые: слой хемоклина (до ~2,5 м) с соленостью до

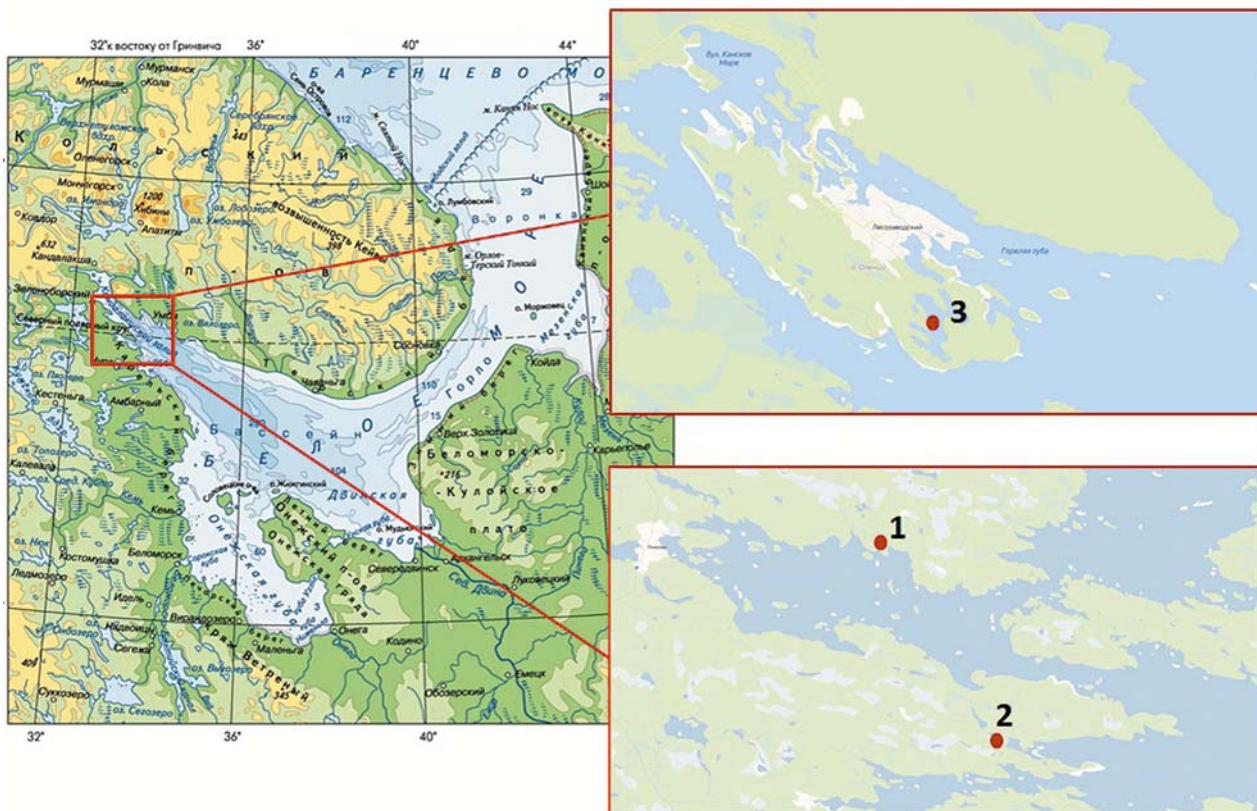


Рис. 1. Карта-схема объектов исследования: 1 – оз. Нижнее Ершовское; 2 – оз. Трехцветное; 3 – оз. Большие Хрусломены

Fig. 1. Schematic map of the study objects: 1 – Lake Nizhneye Ershovskoye; 2 – Lake Trekhtsvetnoye; 3 – Lake Bol'shie Khruslomeny

11,9 епс и появлением сероводорода; слой минималимниона (от 3,0 до 7,0 м) с постоянными температурой (6–7 °С) и соленостью (~22 епс), содержание сероводорода в котором достигает 600 мг/л [Лосюк и др., 2021]. Между этими слоями находится узкий пикноклин с резкими физико-химическими градиентами. Слой зеленой воды мощностью 15–20 см располагается непосредственно над хемоклином. На границе аэробной и анаэробной зон в большом количестве присутствуют аноксигенные фототрофные бактерии (зеленоокрашенные серобактерии), которые и придают ярко-зеленый цвет воде [Лосюк и др., 2021, 2023].

Озеро Большие Хрусломены имеет сложную форму и максимальную глубину около 20 м. Оно отделено от моря фильтрующей дамбой, через которую соленая вода при каждом приливе поступает в водоем. Озеро имеет устойчивую стратифицированную структуру (меромиктическую): солоноватый (4–7 епс) верхний слой толщиной около 2 м (миксолимнион), ниже располагаются гало-, термо- и хемоклин, а в минималимнионе сохраняется реликтовая соленая вода с наибольшей соленостью возле дна

около 24 епс. Сезонные колебания температуры происходят в верхних слоях, в зоне ниже хемоклина (около 3 м) температура остается практически одинаковой (7 °С). Содержание сероводорода в озере обнаруживается с глубины 4 м (ниже хемоклина) и возрастает с глубиной до 600 мг/л [Savichev et al., 2020].

Пробы воды для исследования отбирались в марте 2019 года сотрудниками ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН во время работы комплексной экспедиции на БС МГУ.

Отбор проводился в наиболее глубокой точке акватории озер с разных горизонтов (учитывая пресный и соленый слои, а также слой хемоклина) горизонтальным поликарбонатным батометром (США) объемом 2 л.

Анализ проб воды на содержание индивидуальных ХФС проводился в соответствии с РД 52.24.507-2012. Образцы воды подкисляли до рН 2–3 и экстрагировали гексаном. После разделения фаз и рекстракции раствором K_2CO_3 соединения дериватизировали уксусным ангидридом с получением ацетильных производных. Анализ проб воды на содержание хлороформа проводился согласно

МИ № 88–16365–002–2014. Для количественного определения и идентификации индивидуальных ХОС применялся газовый хроматограф «Кристалл 5000.1» с электрозахватным детектором при использовании кварцевой капиллярной колонки с неполярной неподвижной жидкой фазой ZB-5 (30 м × 0,32 мм).

Результаты и обсуждение

В пробах озерной воды из всего ряда проанализированных ХФС (34 стандартных соединения) были идентифицированы только хлорированные фенолы (табл.). Компонентный состав этих соединений представлен рядом от моно- до тетрахлорзамещенных фенолов (рис. 2). Токсичный пентахлорфенол (из группы стойких органических загрязнителей), имеющий только антропогенное происхождение, не обнаружен.

Суммарное содержание хлорированных фенолов по всем озерам составило от 0,06 до 49,9 мкг/дм³, при этом самые высокие концентрации обнаружены в водах нижних слоев. Следует отметить, что для природных вод нормативы на содержание хлорированных фенолов отсутствуют. Для сравнения можно привести данные исследований поверхностных вод пресных озер и рек Канады – от 0,002 до 2,0 мкг/дм³ [Czaplicka, 2004].

Как видно из данных таблицы, наибольшее содержание хлорфенолов установлено

в воде оз. Трехцветного, водоема с доказанной меромиктической структурой [Лосюк и др., 2021], – от 0,059 до 49,9 мкг/дм³. При этом если в верхнем пресном слое суммарное содержание хлорфенолов невелико (0,06 мкг/дм³), то к нижним слоям (с нарастающим содержанием соли в воде) наблюдалось резкое повышение их концентраций: в зоне хемоклина – на два порядка (5,85 мкг/дм³), в придонном слое – на три порядка (49,9 мкг/дм³).

При изучении компонентного состава хлорфенолов в верхних слоях выявлены только высокохлорированные три- и тетрахлорфенолы (2,3,5-, 2,4,6-трихлорфенолы, 2,3,5,6-тетрахлорфенол). Известно, что источниками образования трихлорфенолов наряду с их продуцированием могут быть и процессы восстановительного дехлорирования 2,3,5,6-тетрахлорфенола в присутствии анаэробных микроорганизмов [Field, Sierra-Alvarez, 2007]. Присутствие тетрахлорфенолов в воде в большей степени связано с их поступлением от абиотических источников образования (например, процессов сжигания/горения древесины и пр.) [Field, 2016].

В придонном слое наряду с 2,3,5- и 2,4,5-трихлорфенолами зафиксировано присутствие в значимых количествах еще и низкохлорированных фенолов (моно-, ди-). Скорее всего, в соленых водах в сильно восстановительных условиях, вызванных экстремально высоким содержанием сероводорода (~ 600 мг/л)

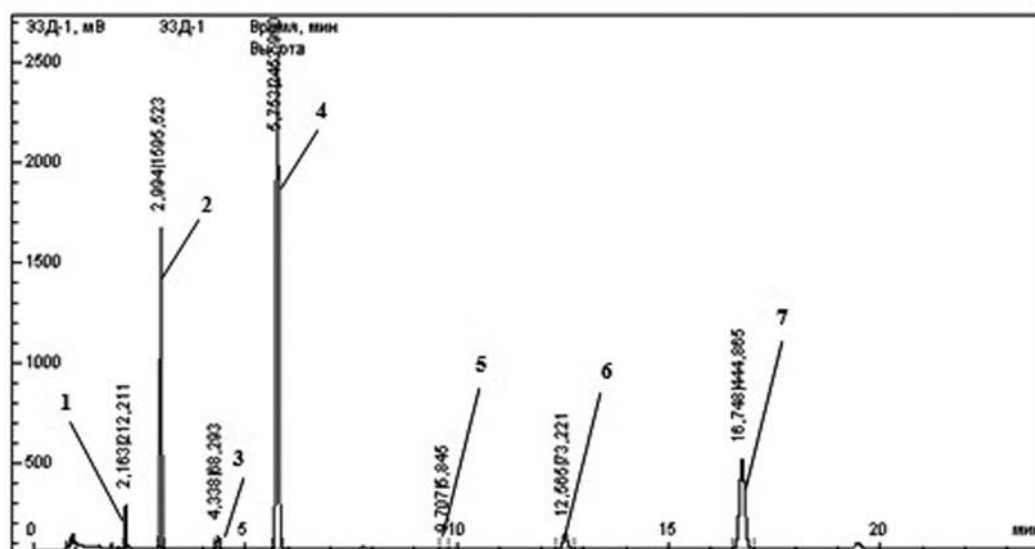


Рис. 2. Типичная хроматограмма экстрактов воды озера Трехцветное (глубина 7,0 м): 1 – 4-хлорфенол; 2 – 2-хлорфенол; 3 – 2,3-дихлорфенол; 4 – 2,4-дихлорфенол; 5 – 2,6-дихлорфенол; 6 – 2,3,5-трихлорфенол; 7 – 2,4,5-трихлорфенол

Fig. 2. Typical chromatogram of water extracts from Lake Trekhtsvetnoye (depth 7.0 m): 1 – 4-chlorophenol; 2 – 2-chlorophenol; 3 – 2,3-dichlorophenol; 4 – 2,4-dichlorophenol; 5 – 2,6-dichlorophenol; 6 – 2,3,5-trichlorophenol; 7 – 2,4,5-trichlorophenol

[Краснова, 2021; Лосюк и др., 2023], активность процессов продуцирования хлорфенолов снижается и, напротив, процессы их восстановительного (анаэробного) дехлорирования более активны. Высокое значение концентрации хлорированных фенолов в придонном слое свидетельствует о накоплении здесь этих соединений.

Концентрации хлорфенолов того же порядка, что и в оз. Трехцветном, найдены в воде оз. Большие Хрусломены – от 0,53 до 33,7 мкг/дм³ (табл.). При этом здесь, по аналогии с Трехцветным, в верхнем пресном слое содержание хлорфенолов невелико (0,53 мкг/дм³), в зоне хемоклина концентрации хлорфенолов выше на порядок (5,13 мкг/дм³), а в придонном слое – уже на два порядка (33,7 мкг/дм³). Компонентный состав хлорфенолов в верхнем слое представлен преимущественно 2-хлорфенолом и 2,3,4-трихлорфенолом, в воде зоны хемоклина преобладали монохлорфенолы (2- и 4-хлорфенолы), а в придонном слое доминировал 2,4,5-трихлорфенол.

Озеро Нижнее Ершовское отличалось невысокими концентрациями хлорированных фено-

лов в воде – от 0,08 до 0,12 мкг/дм³ (табл.). При этом резких отличий как в содержании, так и в составе хлорфенолов в водных слоях с разным уровнем солености не наблюдалось. Наиболее значимыми по количественному содержанию были 2-хлорфенол и 2,4,5-трихлорфенол.

Хлороформ был найден во всех исследованных пробах озерной воды (табл.). Концентрации его составляли от 0,06 до 0,99 мкг/дм³. Общих закономерностей распределения хлороформа по глубине исследованных озер не наблюдалось. В озере Трехцветное отмечено снижение хлороформа по глубине, в озере Большие Хрусломены максимальные концентрации хлороформа найдены в воде на глубине 3 м, в зоне хемоклина. В озере Нижнее Ершовское установлено увеличение концентраций хлороформа в воде по глубине, что может быть обусловлено его поступлением с грунтовыми водами из почв водосборных территорий. Кроме того, более высокое содержание хлороформа в воде нижележащих слоев может быть связано с образованием этого соединения водными продуцентами, а также с медленным его продвижением в водной толще к поверхности и активным

Содержание ХОС (мкг/дм³) в озерной воде на разных глубинах

Content of organochlorine compounds (µg/dm³) in lake water at different depths

Соединение Compound	оз. Трехцветное Lake Trekhtsvetnoye			оз. Большие Хрусломены Lake Bol'shie Khruslomeny			оз. Нижнее Ершовское Lake Nizhneye Ershovskoye	
	1,5 м	3,0 м	7,0 м	1,0 м	3,0 м	17,0 м	1,0 м	2,0 м
2-хлорфенол 2-chlorophenol	н.о. n.d.	3,06	5,72	0,22	2,66	3,72	0,05	0,03
4-хлорфенол 4-chlorophenol	н.о. n.d.	н.о. n.d.	1,41	н.о. n.d.	1,75	4,77	н.о. n.d.	0,02
2,3-дихлорфенол 2,3-dichlorophenol	н.о. n.d.	н.о. n.d.	0,40	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.
2,4-дихлорфенол 2,4-dichlorophenol	н.о. n.d.	0,79	18,1	н.о. n.d.	0,50	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.
2,6-дихлорфенол 2,6-dichlorophenol	н.о. n.d.	1,99	0,13	н.о. n.d.	0,19	1,49	0,02	0,03
2,3,4-трихлорфенол 2,3,4-trichlorophenol	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	0,27	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.
2,3,5-трихлорфенол 2,3,5-trichlorophenol	0,04	н.о. n.d.	0,13	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.
2,4,5-трихлорфенол 2,4,5-trichlorophenol	н.о. n.d.	н.о. n.d.	24,0	н.о. n.d.	0,03	23,6	0,05	н.о. n.d.
2,4,6-трихлорфенол 2,4,6-trichlorophenol	0,01	0,01	н.о. n.d.	0,02	н.о. n.d.	0,15	н.о. n.d.	н.о. n.d.
2,3,4,6-тетрахлорфенол 2,3,4,6-tetrachlorophenol	н.о. n.d.	< 0,03	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	< 0,03	< 0,03
2,3,5,6-тетрахлорфенол 2,3,5,6-tetrachlorophenol	< 0,03	н.о. n.d.	н.о. n.d.	< 0,03	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.	н.о. n.d.
Сумма хлорфенолов Total chlorophenol content	0,06	5,85	49,9	0,53	5,13	33,7	0,12	0,08
Хлороформ Chloroform	0,44	0,41	0,29	0,11	0,31	0,12	0,06	0,99

Примечание. н.о. – не обнаружено; 0,03 – предел обнаружения тетрахлорфенолов.

Note. n.d. – not detected; 0.03 – detection limit of tetrachlorophenols.

испарением из верхних горизонтов. В целом выявленные концентрации хлороформа соответствовали данным, полученным для ранее обследованных озер Архангельской области, – от 0,05 до 5,3 мкг/дм³ [Колпакова, Вельямидова, 2019], а также для озер Онтарио и Верхнее (система Великих озер, Северная Америка) – до 4,2 мкг/л [Watts et al., 2004].

Заключение

При исследовании стратифицированных озер, расположенных в Кандалакшском заливе Белого моря и не подверженных прямому антропогенному воздействию, выявлено наличие в озерной воде хлорорганических соединений. Уровни содержания и компонентный состав этих соединений в озерной воде обусловлены преимущественно природными источниками их образования. Показано, что в соленых водах в сильно восстановительных условиях активность естественных процессов хлорирования органического вещества снижается, а продуктивность процессов восстановительного дехлорирования хлорфенольных соединений с участием анаэробных микроорганизмов возрастает, что приводит к накоплению этих соединений в анаэробных водах монимолимиона.

Литература

Колпакова Е. С. Хлорфенольные соединения в пресноводных озерах субарктических регионов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64, № 4. С. 380–390. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-380-390

Колпакова Е. С., Вельямидова А. В. Мониторинг содержания хлороформа в воде пресноводных водоемов // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: Мат-лы II Всерос. науч.-практ. конф., приуроченной к 55-летию кафедры гидрологии и природопользования ИГУ (Иркутск, 5–7 июня 2019 г.). Иркутск, 2019. С. 185–190.

Колпакова Е. С., Вельямидова А. В. Хлорорганические соединения в субарктических малых озерах // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66, № 2. С. 180–197. doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-2-180-197

Краснова Е. Д. Водоемы, отделяющиеся от Белого моря: разнообразие и типовая структура // Изучение, рациональное использование и охрана природных ресурсов Белого моря: Мат-лы XIII Всерос. конф. с междунар. участием: приурочено к 60-летию Беломорской биостанции Зоологического института РАН «Мыс Картеш» (Санкт-Петербург, 17–20 октября 2017 г.). СПб., 2017. С. 115–118.

Краснова Е. Д., Пантюлин А. Н., Белевич Т. А., Воронов Д. А., Демиденко Н. А., Житина Л. С., Ильяш Л. В., Кокрятская Н. М., Лунина О. Н., Мардашова М. В., Прудковский А. А., Саввичев А. С., Филиппов А. С., Шевченко В. П. Комплексные исследования отделяющихся водоемов на разных стадиях изоляции от

Белого моря в марте 2012 г. // Океанология. 2013. Т. 53, № 5. С. 714–717. doi: 10.7868/s0030157413050067

Краснова Е. Д. Экология меромиктических озер России. 1. Прибрежные морские водоемы // Водные ресурсы. 2021. Т. 48, № 3. С. 322–333. doi: 10.31857/S0321059621030093

Лосюк Г. Н., Кокрятская Н. М., Краснова Е. Д. Сероводородное заражение прибрежных озер на разных стадиях изоляции от Белого моря // Океанология. 2021. Т. 61, № 3. С. 401–412. doi: 10.31857/S003015742102012X

Лосюк Г. Н., Кокрятская Н. М., Вахрамеева Е. А., Алиев Р. А. Соединения восстановленной серы в донных осадках водоемов на разных стадиях отделения от Кандалакшского залива Белого моря (меромиктическое озеро Трехцветное) // Океанология. 2023. № 5. С. 784–795. doi: 10.31857/S0030157423050076

Czaplicka M. Sources and transformations of chlorophenols in the natural environment // Sci. Total Environ. 2004. Vol. 322. P. 21–39.

Field J. A., Sierra-Alvarez R. Biodegradability of chlorinated aromatic compounds // Science dossier. Euro Chlor. 2007. P. 15–33.

Field J. A. Natural production of organohalide compounds in the environment // Organohalide-respiring bacteria. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. P. 7–29. doi: 10.1007/978-3-662-49875-0_2

Gribble G. W. Naturally occurring organohalogen compounds – a comprehensive update. Wien, New York: Springer, 2010. 613 p.

Kokryatskaya N. M., Kolpakova E. S., Titova K. V., Velyamidova A. V. Sulfur and chlorine compounds in water bodies of the Pymvashor subarctic hydrothermal system // Environ. Sci. Pollut. Res. 2023. Vol. 30. P. 27328–27339. doi: 10.1007/s11356-022-24141-y

Savichev A. S., Kadnikov V. V., Rusanov I. I., Beletsky A. V., Krasnova E. D., Voronov D. A., Kallistova A. Yu., Veslopolova E. F., Zakharova E. E., Kokryatskaya N. M., Losyuk G. N., Demidenko N. A., Belyaev N. A., Sigalevich P. A., Mardanov A. V., Ravin N. V., Pimenov N. V. 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. 2020. No. 11. doi: 10.3389/fmicb.2020.01945

Watts P., Long G., Meek M. E. Chloroform. Concise International Chemical Assessment Document No. 58. Geneva: World Health Organization, 2004. 58 p.

References

Czaplicka M. Sources and transformations of chlorophenols in the natural environment. *Sci. Total Environ.* 2004;322:21–39.

Field J. A. Natural production of organohalide compounds in the environment // *Organohalide-respiring bacteria*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2016. P. 7–29. doi: 10.1007/978-3-662-49875-0_2

Field J. A., Sierra-Alvarez R. Biodegradability of chlorinated aromatic compounds. *Science dossier. Euro Chlor.* 2007. P. 15–33.

Gribble G. W. Naturally occurring organohalogen compounds – a comprehensive update. Wien, New York: Springer; 2010. 613 p.

Kolpakova E. S. Chlorophenol compounds in freshwater lakes of subarctic regions. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2018;64(4):380–390. (In Russ.). doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-380-390

Kolpakova E. S., Velyamidova A. V. Monitoring chloroform content in the water of freshwater reservoirs. *Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii: Mat-ly II Vseros. nauch.-prakt. konf., priurochennoi k 55-letiyu kafedry gidrologii i prirodopol'zovaniya IGU (Irkutsk, 5–7 iyunya 2019 g.) = Current trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia: Proceed. II All-Russ. scientific-pract. conf. dedicated to the 55th anniversary of the Department of Hydrology and Environmental Management of ISU (Irkutsk, June 5–7, 2019)*. Irkutsk, 2019. P. 185–190. (In Russ.).

Kolpakova E. S., Velyamidova A. V. Organochlorine compounds in subarctic small lakes. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2020;66(2):180–197. (In Russ.). doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-2-180-197

Kokryatskaya N. M., Kolpakova E. S., Titova K. V., Velyamidova A. V. Sulfur and chlorine compounds in water bodies of the Pymvashor subarctic hydrothermal system. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2023;30:27328–27339. doi: 10.1007/s11356-022-24141-y

Krasnova E. D. Reservoirs separating from the White Sea: diversity and typical structure. *Izuchenie, ratsional'noe ispol'zovanie i okhrana prirodnykh resursov Belogo morya: Mat-ly XIII Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiyem, priurocheno k 60-letiyu Belomorskoj biostantsii Zoologicheskogo instituta RAN «Mys Kartesh» (Sankt-Peterburg, 17–20 oktyabrya 2017 g.) = Study, rational use and protection of natural resources of the White Sea: Proceed. XIII All-Russ. conf. with int. part. dedicated to the 60th anniversary of the White Sea*

Biological Station of the Zoological Institute of the RAS 'Cape Kartesh' (St. Petersburg, Oct. 17–20, 2017). St. Petersburg; 2017. P. 115–118. (In Russ.).

Krasnova E. D., Pantyulin A. N., Belevich T. A., Voronov D. A., Demidenko N. A., Zhitina L. S., Il'yash L. V., Kokryatskaya N. M., Lunina O. N., Mardashova M. V., Prudkovskii A. A., Savichev A. S., Filippov A. S., Shevchenko V. P. Multidisciplinary studies of the separating lakes at different stages of isolation from the White Sea performed in March 2012. *Oceanology*. 2013;53(5): 639–642. doi: 10.1134/S0001437013050068

Krasnova E. D. Ecology of meromictic lakes of Russia. 1. Coastal marine waterbodies. *Water Resources*. 2021;48(3):427–438. doi: 10.1134/S009780782103009X

Losyuk G. N., Kokryatskaya N. M., Krasnova E. D. Hydrogen sulfide contamination of coastal lakes at different stages of isolation from the White Sea. *Oceanology*. 2021;61(3):351–361. doi: 10.1134/S0001437021020120

Losyuk G. N., Kokryatskaya N. M., Vakhrameeva E. A., Aliev R. A. Reduced sulfur compounds in bottom sediments of lakes at different stages of separation from Kandalaksha Bay of the White Sea (meromictic Lake Trekhtsvetnoye). *Okeanologiya = Oceanology*. 2023;5:784–795. (In Russ.). doi: 10.31857/S0030157423050076

Savichev A. S., Kadnikov V. V., Rusanov I. I., Beletsky A. V., Krasnova E. D., Voronov D. A., Kallistova A. Yu., Veslopolova E. F., Zakharova E. E., Kokryatskaya N. M., Losyuk G. N., Demidenko N. A., Belyaev N. A., Sigalovich P. A., Mardanov A. V., Ravin N. V., Pimenov N. V. 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*. 2020;11. doi: 10.3389/fmicb.2020.01945

Watts P., Long G., Meek M. E. Chloroform. Concise International Chemical Assessment Document No. 58. Geneva: World Health Organization; 2004. 58 p.

Поступила в редакцию / received: 04.05.2024; принята к публикации / accepted: 09.07.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Колпакова Елена Сергеевна

научный сотрудник

e-mail: kolpelen@yandex.ru

Вельямидова Анна Владиславовна

канд. хим. наук, старший научный сотрудник

e-mail: allavel@yandex.ru

Королева Татьяна Алексеевна

канд. техн. наук, научный сотрудник

e-mail: tataak@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Kolpakova, Elena

Researcher

Velyamidova, Anna

Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher

Koroleva, Tatiana

Cand. Sci. (Eng.), Researcher