

УДК 502.17

РЕКОГНОСЦИРОВОЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ГАЛОГЕНОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ОЗЕРАХ АРХАНГЕЛЬСКОЙ И МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТЕЙ

Т. А. Королева*, Е. А. Вахрамеева, Р. Д. Коробицына

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

Повсеместное распространение органогалогенов в качестве естественного компонента органического вещества и долгосрочное использование искусственных промышленных органогалогенов способствовало их накоплению во всех оболочках Земли. В статье приведены результаты рекогносцировочных исследований содержания галогенорганических соединений в озерах, расположенных в субарктической климатической зоне на территории Архангельской и Мурманской областей. Содержание органогалогенов в природной воде оценивали по параметру «концентрация адсорбируемых галогенорганических соединений». Анализ данных, полученных при проведении рекогносцировочных исследований, показал, что для каждого водного объекта характерно индивидуальное значение концентрации адсорбируемых галогенорганических соединений. В пресных озерах, находившихся под прямым влиянием морской среды, средние значения концентраций адсорбируемых органических соединений изменялись в диапазоне от $0,048 \pm 0,008$ до $0,231 \pm 0,023$ мг/дм³. Минимальное значение было зафиксировано в пресном оз. Банное/Малые Хрусломены на о. Оленьем (Кандалакшский залив), максимальное – в оз. Малом Каменном. В меромиктическом оз. Мертвом на о. Большом Соловецком концентрация адсорбируемых галогенорганических соединений не превысила $0,138 \pm 0,014$ мг/дм³. Сравнение результатов исследования пресных озер с различной удаленностью от Белого моря показало, что средние значения концентраций адсорбируемых галогенорганических соединений в озерах, находившихся под прямым влиянием моря, в три и более раз выше, чем в озерах, отдаленных от моря.

Ключевые слова: концентрация адсорбируемых галогенорганических соединений; озера; Архангельская и Мурманская области; природная вода; Белое море; рекогносцировочные исследования

Для цитирования: Королева Т. А., Вахрамеева Е. А., Коробицына Р. Д. Рекогносцировочные исследования содержания галогенорганических соединений в озерах Архангельской и Мурманской областей // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 4. С. 14–24. doi: 10.17076/lim2137

T. A. Koroleva*, E. A. Vakhrameeva, R. D. Korobitsyna. RECONNAISSANCE STUDIES OF ORGANOHALIDES IN LAKES OF THE ARKHANGELSK AND MURMANSK REGIONS

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

The ubiquity of organohalides as a natural component of organic matter, as well as the long-term use of industrial organohalides have resulted in the accumulation of these compounds in all spheres of the Earth. This paper presents the results of reconnaissance surveys for the content of organohalides in lakes located in the subarctic climatic zone of the Arkhangelsk and Murmansk Regions. The metric for the content of organohalides in natural water was the concentration of adsorbable organically bound halogens (AOX). Analysis of the data from the reconnaissance surveys showed that the adsorbable organohalide concentrations were specific to each individual water body. The average AOX concentrations in freshwater lakes directly influenced by the marine environment ranged from 0.048 ± 0.008 to 0.231 ± 0.023 mg/dm³. The lowest value was recorded in the freshwater Lake Bannoe/Malye Khruslomeny on Oleniy Island (Gulf of Kandalaksha), and the highest – in Lake Maloe Kamennoe. The AOX concentration in the meromictic Lake Myortvoe on Bolshoy Solovetsky Island did not exceed 0.138 ± 0.014 mg/dm³. A comparison of the results for freshwater lakes situated at different distances from the White Sea showed that the average AOX concentrations in lakes under immediate marine influence were three or more times higher than in lakes located farther away from the sea.

Keywords: adsorbable organic halogen concentrations; lakes; Arkhangelsk and Murmansk Regions; natural waters; White Sea; reconnaissance surveys

For citation: Koroleva T. A., Vakhrameeva E. A., Korobitsyna R. D. Reconnaissance studies of organohalides in lakes of the Arkhangelsk and Murmansk Regions. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 14–24. doi: 10.17076/lim2137

Введение

В настоящее время хорошо известно, что хлор-, бром-, йод-, фторорганические соединения повсеместно распространены в окружающей среде, они продуцируются морскими и пресноводными водорослями, губками, кораллами, мшанками, голожаберниками, грибами, бактериями; наземными растениями, грибами, бактериями; насекомыми, высшими животными, а также эти соединения образуются в результате абиотических процессов (извержения вулканов, лесных пожаров, геотермальных явлений) [Gribble, 2023]. К 2023 году было идентифицировано около 8000 галогенорганических соединений (ГОС) природного происхождения [Gribble, 2023].

Однако долгое время в научном сообществе считалось, что присутствие ГОС в природных объектах свидетельствует об их загрязнении, поскольку природу появления этих соединений связывали исключительно с антропогенными источниками. Только с 1994 года в информационном поле появились многочисленные обзоры общего и узкоспециализированного характера, посвященные

ГОС естественного/природного происхождения [Gribble, 2023].

В международной практике для определения общего количества ГОС в воде наиболее широкое применение получил метод, основанный на выполнении нескольких последовательных процессов: адсорбции ГОС активированным углем с последующей промывкой для удаления оставшихся галогенидов; высокотемпературного сжигания в потоке кислорода (в аэробных условиях) и/или термогидролиз (в анаэробных условиях) для полного преобразования адсорбированных на активированном угле ГОС в газообразное состояние; детектирования галогенидов в акцепторном растворе при использовании микрокулометрии и/или ионной хроматографии [Chen et al., 2020; Yang et al., 2024].

Впервые этот метод был разработан в Германии в 1970-х гг. для оценки содержания ГОС в питьевой воде, но активное применение он получил в 1990-х гг. в качестве инструмента контроля загрязняющих веществ в промышленных сточных водах. Более 25 лет в странах Европы, США, Китае сброс органогалогенов в окружающую среду для предприятий текстильной,

кожевенной, кузнечно-литейной, целлюлозно-бумажной промышленности, производства органических и неорганических химикатов и полимеров, переработки черных металлов, а также для общих систем очистки и управления сточными водами и др. контролируется с помощью параметра «концентрация адсорбируемых галогенорганических соединений (АОГ)». Для каждого промышленного сектора разработаны нормативы сброса на единицу готовой продукции, приведенные в специальных справочниках, для стран Европы это справочники по наилучшим доступным технологиям (The Reference Document on Best Available Techniques (BREF)), для Соединенных Штатов Америки это действующие правила (Existing Regulations), разработанные агентством по охране окружающей среды (Environmental Protection Agency). В Китае содержание ГОС в сточных водах ограничивается концентрацией АОГ, пограничные значения которой приведены в национальных стандартах промышленных сбросов [Zhang et al., 2015].

Безусловно, введение параметра АОГ в систему производственного и государственного экологического контроля экономически обосновано, поскольку он позволяет заменить трудоемкие и дорогостоящие процедуры по определению индивидуальных соединений. Кроме того, величина параметра АОГ позволяет оценить общее количество как идентифицированных, так и неизвестных загрязняющих органических соединений в сточных водах.

В природной воде компонентный состав ГОС объединяет в себе соединения и природного, и антропогенного происхождения, вследствие чего оценить антропогенную составляющую по значению концентрации АОГ невозможно. Кроме того, образование ГОС и их накопление в водных объектах зависит от ряда факторов: географических и морфометрических характеристик объекта; интенсивности гидрохимических процессов и активности биоты как в самом водном объекте, так и на его водосборной территории. Многие из этих факторов отличаются изменчивостью в течение календарных и межгодовых периодов, усиливая или ослабляя процессы образования и поступления ГОС в компоненты окружающей среды. Несмотря на данные обстоятельства, с 2015 года параметр «концентрация АОГ» был внесен в перечень загрязняющих веществ для водных объектов, что подразумевает применение мер государственного регулирования в области охраны окружающей среды. Это, в свою очередь, влечет за собой определение и введение предельно допустимой концентрации для водных объек-

тов. Однако в России доступной и объективной информации о концентрации АОГ в природной воде, ее межсезонной и межгодовой стабильности или изменчивости практически нет.

Таким образом, для осуществления грамотного и сбалансированного подхода к законодательному регулированию параметра АОГ в водных объектах в первую очередь необходимы исследования концентрации АОГ в течение межсезонных и межгодовых периодов.

В представленной работе приведены результаты рекогносцировочных исследований концентрации АОГ в озерах, расположенных на территории Архангельской и Мурманской областей, которые различаются степенью удаленности от Белого моря и уровнем воздействия антропогенной нагрузки.

Материалы и методы

Архангельская и Мурманская области находятся в субарктической климатической зоне. Территории областей расположены в зоне избыточного увлажнения с густой и разветвленной речной сетью, многочисленными озерами и болотами. Положительный водный баланс обеспечивает повышенный сток при наличии даже небольших уклонов местности. Основным источником питания рек и озер – талые снеговые и дождевые воды. Главная доля стока приходится на период весеннего половодья. Самые низкие величины стока наблюдаются зимой. Климат формируется в условиях малого количества солнечной радиации зимой под влиянием северных морей и интенсивного западного переноса, обеспечивающего вынос влажных морских масс воздуха с Атлантического океана.

Большая часть Мурманской области расположена за Северным полярным кругом, и на ее территории преобладает субарктический морской климат. Архангельская область имеет более разнообразный климат, включая умеренно-континентальный на юге, субарктический на северо-востоке и с морским влиянием на северо-западе.

Для исследования были выбраны озера на западе Архангельской области в Онежском заливе Белого моря на о. Большом Соловецком: Святое, Питьевое, Варваринское, Мертвое, Малое Каменное, Большое Каменное (рис. 1). Климат на Соловецких островах умеренно-холодный, морской, с чертами континентального. Озера питаются атмосферными осадками и подземными водами, часть связаны каналами, формируя сложную гидрологическую сеть с контрастными характеристиками [Отчет..., 1989].



Рис. 1. Карта-схема исследованных водных объектов, расположенных на территории Большого Соловецкого острова

Fig. 1. Schematic map of the studied water bodies located on the territory of the Bolshoy Solovetsky Island

Большой Соловецкий остров находится на значительном расстоянии от материка, ближайшее расстояние до Онежского полуострова составляет 40 км и 60 км до города Кеми в Карелии. Исследованные озера не испытывали какого-либо прямого антропогенного влияния, в настоящее время они подвержены только рекреационному воздействию (туристические прогулки, купание местных жителей и туристов, домашних животных и скота, рыбная ловля). В ходе экспедиции обнаружено, что оз. Святое дополнительно подвержено влиянию стока воды с взлетно-посадочной полосы. Озеро Варваринское, ввиду его отдаленного местонахождения, испытывает минимальное воздействие рекреационной нагрузки. Следует отметить, что оз. Малое Каменное находится в юго-восточной части острова, для которой характерными являются болота и торфяники.

В Мурманской области в Кандалакшском заливе на о. Оленьем были проанализированы пробы воды из пресного оз. Банного (Малые Хрусломены). Этот водный объект до 1854 года через канал соединялся с оз. Большие Хрусломены, которое имело сообщение с морем. В 1854 г. ввиду потребности в пресной воде для

заправки паровых машин оз. Банное было изолировано от оз. Большие Хрусломены искусственно созданной фильтрующей дамбой. Таким же способом было отделено от моря и оз. Большие Хрусломены (рис. 2) [Чуднов, 1926]. Все водоемы на острове образовались в результате подъема суши из морского залива и постепенного опреснения стоками талых, дождевых и болотных вод [Карпович, 1984].

Озера различаются между собой морфологическими и морфометрическими характеристиками, но все они являются малопроточными с малыми удельным водосбором и величиной условного водообмена. Озерные воды насыщены кислородом (до 12 мг/дм³), минерализация низкая (менее 0,2 г/дм³), для озер в Каргопольском и Коношском районах преимущественно гидрокарбонатно-кальциевая, для озер Большого Соловецкого острова и оз. Банного – гидрокарбонатно-натриевая [Беспалая, Болотов, 2006].

Объекты на юго-западе Архангельской области были исследованы ранее [Королева и др., 2023], результаты этой работы используются для сравнения с вновь полученными данными для озер, расположенных на о-вах Большом Соловецком и Оленьем.

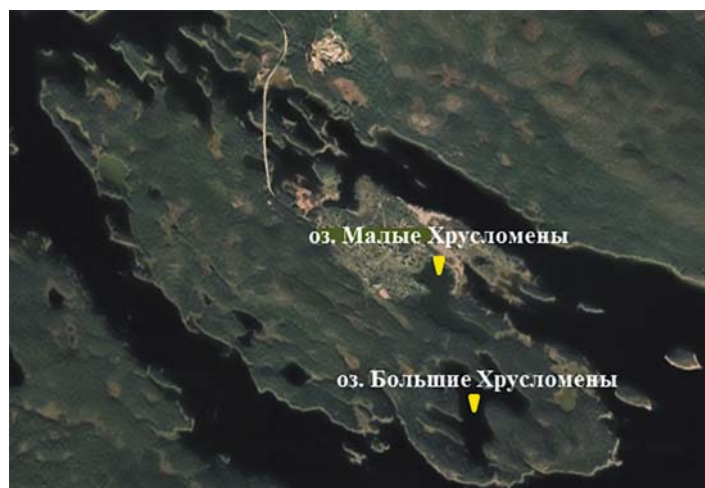


Рис. 2. Карта-схема исследованных озер, расположенных на территории о. Оленьего Мурманской области

Fig. 2. Schematic map of the studied lakes located on the territory of Oleniy Island, Murmansk Region

Изученные ранее водные объекты – оз. Нижнее-Верхнее в Коношском районе и озера Масельгское, Саргозеро и Вильно в Каргопольском районе (рис. 3) находятся под влиянием условий умеренно-континентального климата [Королева и др., 2023]. На водосборной территории оз. Нижнего в прошлом многие десятилетия размещалась промплощадка лесозавода, где для антисептирования пиломатериалов применялся отечественный хлорфенольный биоцид. Почвы промплощадки до сих пор слу-

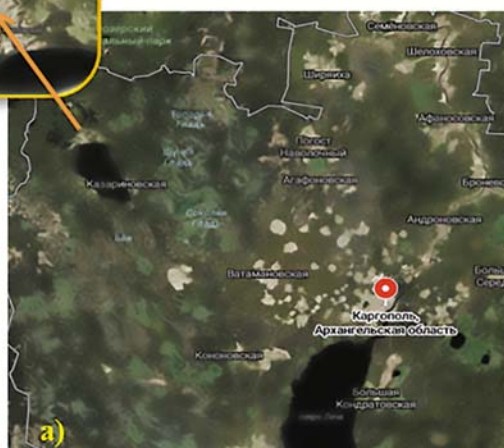
жат источником поступления токсичных хлорорганических соединений в озера Нижнее и Верхнее. Озера в Каргопольском районе принадлежат Кенозерскому национальному парку федерального значения и исторически не подвергались какому-либо прямому антропогенному воздействию [Королева и др., 2023].

Пробы воды для определения параметра АОГ отбирались сотрудниками ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН в разные временные промежутки: в Каргопольском и Коношском районах в 2011–2019 гг.



Рис. 3. Карта-схема исследованных водных объектов, расположенных на территории Архангельской области: а) Каргопольский район; б) Коношский район

Fig. 3. Schematic map of the studied water bodies located in the Arkhangelsk Region: а) Kargopolsky District; б) Konoshsky District



(март, июнь, июль, октябрь); на о. Большом Соловецком в июле 2021 и 2022 гг.; на о. Оленьем в июле 2024 года.

Процедура отбора проб воды соответствовала ГОСТ 31861-2012 «Вода. Общие требования к отбору проб». Пробы консервировались путем добавления концентрированной азотной кислоты до pH 2,0–2,5. При отборе воды контролировали значения температуры, pH и удельной электропроводности. pH измеряли с помощью pH-метра pH231 в соответствии с методикой, приведенной в РД 52.24.495-2017 «Водородный показатель вод. Методика измерений потенциометрическим методом». Температуру фиксировали портативным оксиметром HQ30D.99, удельную электропроводность – кондуктометром EC232. При определении температуры и удельной электропроводности воды приборы использовались в соответствии с приложенными к ним инструкциями.

Определение концентрации АОГ в озерной воде проводили по аттестованной методике ФР.1.31.2021.40350 «Методика измерений массовых концентраций адсорбируемых органически связанных галогенов (АОХ) в пробах питьевых, природных и сточных вод методом микрокулонометрического титрования», разработанной на основе ISO 9562 в аккредитованной лаборатории экоаналитических исследований ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН. Суть метода заключается в адсорбции галогенов (Cl, Br, I, F) из пробы воды на активированном сверхчистом угле с последующим сжиганием угля в потоке кислорода при температуре 950–1000 °С и измерении массовой концентрации выделившихся галогенов методом кулонометрического титрования в ячейке анализатора multi X 2500 (Analytik Jena, Германия). Концентрации АОГ выражали в единицах мг/дм³ с пересчетом на хлор. Согласно методике, содержание неорганического хлорида в пробах воды не должно превышать 1 г/дм³. Для всех исследуемых водных объектов содержание хлорид-ионов не превысило 1 г/дм³, интервал варьирования составил от 7 до 60 мг/дм³.

Результаты и обсуждение

Исследуемые объекты можно разделить на две группы: «условно чистые» – к ним относятся озера Масельское, Саргозеро и Вильно в Каргопольском районе, озера на Большом Соловецком острове – Святое, Питьевое, Варваринское, Мертвое, Малое Каменное, Большое Каменное, оз. Банное в Кандалакшском заливе; ко второй группе водных объектов, испытывающих антропогенное влияние, можно отнести систему оз. Нижнего-Верхнего в Коношском районе.

Озера на о. Большом Соловецком и о. Оленьем, включенные в группу «условно чистых» озер, расположены в непосредственной близости к Белому морю. В таблице 1 приведены максимальные глубины в этих озерах, значения pH и электропроводности в пробах воды на различной глубине.

Уровень pH в воде исследованных озер изменялся от слабокислого до сильнощелочного. В оз. Банном в период отбора проб в июле 2024 г. pH воды был сильнощелочным (9,7–9,9), в это время визуально наблюдался процесс активного «цветения» озера. Слабокислая среда в воде (pH 4,7–4,9) зафиксирована в единственном из исследованных озер – Малом Каменном, питание этого озера происходит за счет воды, поступающей с заболоченной близлежащей водосборной территории (рис. 4). Хорошо известно, что болотные торфяники являются аккумулятором гумусового вещества и ГОС [Leri, Ravel, 2015; Lijuan, Baoliang, 2017; Gribble, 2023], а повышенное содержание органического вещества в воде является причиной снижения pH [Чупакова и др., 2017]. Например, в болотной воде, отобранной в июле 2023 г. в Иласском болотном комплексе в 30 км от Архангельска, pH не превышал значений 3,8–4,1, при этом концентрация АОГ была высокой и составляла 0,95–1,00 мг/дм³. В остальных озерах вода имела среду, близкую к нейтральной. Разницу в ландшафте прибрежных территорий оз. Банного и Малого Каменного можно увидеть на фотографиях, приведенных на рис. 4 и 5.

Все исследованные озера, кроме оз. Мертвого, являются пресными. Озеро Мертвое, в котором зарегистрированы высокие значения удельной электропроводности (табл. 1), имеет статус прибрежного морского меромиктического водоема [Краснова, 2021], его происхождение явилось результатом поднятия береговой зоны Белого моря [Нинбург, 1990; Пантюлин, Краснова, 2011].

Значения концентраций АОГ в воде озер о. Большого Соловецкого изменялись в диапазоне от 0,071 до 0,303 мг/дм³, на о. Оленьем – от 0,039 до 0,062 мг/дм³ (табл. 2). Высокие значения, более 0,200 мг/дм³, зарегистрированы в единственном из исследованных объектов – оз. Малом Каменном (табл. 2). Как описано ранее, питание озера обеспечивается болотной водой со слабокислым pH среды, насыщенной органическим веществом и ГОС, что, возможно, и является причиной повышенных значений АОГ. Наиболее низкие значения концентрации АОГ были определены в воде оз. Банного на о. Оленьем.

Таблица 1. Значения pH и электропроводности в воде озер, расположенных на о-вах Большом Соловецком и Оленьем

Table 1. Values of pH and electrical conductivity in the water of lakes located on Bolshoy Solovetsky Island and Oleniy Island

Название озера Name of the lake	Период отбора Sampling period	Глубина, м Depth, m	pH	Электропроводность, мкСм/см Electrical conductivity, $\mu\text{S}/\text{cm}$
о. Большой Соловецкий Bolshoy Solovetsky Island				
Святое Svyatoye	июль/July 2021	0,5	7,1	63,0
		5,5	6,8	63,2
		9,5	6,6	67,2
Питьевое Pit'evoye	«	0,5	7,7	60,1
		4,0	7,6	56,0
		6,0	7,2	55,4
Малое Каменное Maloe Kamennoye	июль/July 2022	0,5	4,9	49,6
		1,0	4,9	49,7
		2,5	4,7	49,7
		9,0	4,7	51,8
Большое Каменное Bol'shoye Kamennoye	«	1,0	6,9	53,2
		4,0	5,6	44,9
		12,0	5,5	46,9
Мертвое Mertvoye (Dead)	«	0,5	8,3	4480
		2,0	7,8	7011
		4,0	7,2	21000
Варваринское Varvarinskoye	«	0,5	8,2	190
		2,5	7,8	187
		8,0	7,3	292
о. Олений, Кандалакшский залив Oleniy Island, Kandalaksha Bay				
Банное (станция №1) Vannoye (station no. 1)	август/August 2024	0,5	9,7	174
		3,0	9,1	180
		5,0	6,8	182
Банное (станция №2) Vannoye (station no. 2)	«	0,5	9,9	185



Рис. 4. Озера Питьевое и Малое Каменное на о. Большом Соловецком (Онежский залив Белого моря, Архангельская область)

Fig. 4. Lakes Pit'evoye and Maloe Kamennoye on Bolshoy Solovetsky Island (Onega Bay of the White Sea, Arkhangelsk Region)



Рис. 5. Озеро Банное и прибрежная территория на о. Оленьем (Кандалакшский залив Белого моря, Мурманская область)

Fig. 5. Lake Bannoe and the coastal area on Oleniy Island (Kandalaksha Bay of the White Sea, Murmansk Region)

Характер распределения концентрации АОГ по глубине для каждого отдельного озера равномерный. Практически во всех озерах разница в значениях концентрации АОГ между слоями воды не превышает границы относительной погрешности измерения и составляет 15–17 %, что позволяет использовать усредненные значения для анализа полученных данных.

Исследованные озера находятся под прямым влиянием Белого моря, крупнейшего резервуара хлорированных, бромированных, в меньшей степени йодированных и фторированных органических соединений [Ballschmiter, 2003; Moore, 2003; Vidleman et al., 2019; Yu, Li, 2021]. Сочетание ветровых процессов и атмосферной динамики в пограничном слое морской среды способствует переносу галогенов с аэрозолями и газами на близлежащие территории, которые в дальнейшем вовлекаются в геохимический цикл ГОС [Fuge, Johnson, 2015; Limoges et al., 2024]. Однако сравнение диапазона средних концентраций группы озер на о. Большом Соловецком, за исключением оз. Малого Каменного (0,085–0,138 мг/дм³), и среднего значения, рассчитанного для оз. Банного на о. Оленьем (0,048 мг/дм³), показало значимые различия в содержании ГОС примерно в 2–3 раза (табл. 2).

Существенная разница в концентрации АОГ в озерах, одинаково приближенных к морю, свидетельствует о том, что содержание ГОС индивидуально для каждой водной экосистемы и может варьировать в широком диапазоне. Относительно высокое содержание ГОС в озерах о. Большого Соловецкого может быть связано с более богатой растительностью поверхностного почвенного слоя на водосборной территории и, как следствие, с более благоприятными условиями для активности биоты и накопления ГОС в компонентах окружающей среды по сравнению с озером на о. Оленьем. На рис. 5 видно, что прибрежная территория о. Оленьего окружена обнаженными древнейшими горными породами, устойчивыми к водной и ветровой эрозии. Различия ландшафтных условий на водосборах приводят к формированию озер с различной экосистемой на островах Большом Соловецком и Оленьем.

Результаты более ранних исследований (2011–2019 гг.) концентрации АОГ в озерах Каргопольского и Коношского районов (юго-западная часть Архангельской области), удаленных от моря, показали [Королева и др., 2023], что содержание АОГ в «условно чистых» озерах изменялось в достаточно широком интервале от 0,010 до 0,045 мг/дм³. Средние значения концентрации в исследованных озерах

Таблица 2. Значения концентрации АОГ в природной воде озер, расположенных на о-вах Большом Соловецком и Оленьем

Table 2. Values of AOX concentration in natural water of lakes located on Bolshoy Solovetsky Island and Oleniy Island

Название озера Name of the lake	Период отбора Sampling period	Глубина, м Depth, m	Концентрация АОГ, мг/дм ³ AOX concentration, mg/dm ³	Среднее значение концентрации АОГ, мг/дм ³ Average value of AOX concentration, mg/dm ³
о. Большой Соловецкий Bolshoy Solovetsky Island				
Святое Svyatoye	июль/July 2021	0,5	0,103 ± 0,016	0,110 ± 0,008
		5,5	0,106 ± 0,016	
		9,5	0,120 ± 0,018	
Питьевое Pit'evoye	«	0,5	0,092 ± 0,016	0,093 ± 0,010
		4,0	0,089 ± 0,015	
		6,0	0,099 ± 0,017	
Малое Каменное Maloye Kamennoye	июль/July 2022	0,5	0,075 ± 0,008	0,231 ± 0,023
		1,0	0,260 ± 0,026	
		2,5	0,303 ± 0,030	
		9,0	0,286 ± 0,029	
Большое Каменное Bol'shoye Kamennoye	«	1,0	0,087 ± 0,009	0,112 ± 0,011
		4,0	0,116 ± 0,012	
		12,0	0,132 ± 0,013	
Мертвое Mertvoye (Dead)	«	0,5	0,147 ± 0,015	0,138 ± 0,014
		2,0	0,173 ± 0,017	
		4,0	0,094 ± 0,009	
Варваринское Varvarinskoye	«	0,5	0,096 ± 0,010	0,085 ± 0,008
		2,5	0,089 ± 0,009	
		8,0	0,071 ± 0,007	
о. Олений, Кандалакшский залив Oleniy Island, Kandalaksha Bay				
Банное (станция №1) Bannoye (station no. 1)	август/August 2024	0,5	0,039 ± 0,007	0,048 ± 0,008
		3,0	0,054 ± 0,010	
		5,0	0,062 ± 0,011	
Банное (станция №2) Bannoye (station no. 2)	«	0,5	0,042 ± 0,007	
		3,0	0,043 ± 0,007	

составили 0,014–0,017 мг/дм³. В системе озер Нижнего-Верхнего, где почвы водосбора являются источником поступления токсичных хлор-органических соединений, параметр АОГ варьировал в диапазоне от 0,012 до 0,088 мг/дм³, при средней концентрации 0,021 (оз. Нижнее) и 0,016 мг/дм³ (оз. Верхнее). Максимальная величина АОГ (0,088 мг/дм³) зарегистрирована в период «цветения» воды в озере. При этом разница между средними концентрациями АОГ в «условно чистых» озерах и в озере, подвергнутом антропогенному воздействию, оказалась несущественной. Содержание АОГ в пробах было непостоянным и зависело от интенсивности внутриводоемных процессов, связанных с изменяющимися климатическими условиями [Королева и др., 2023]. Сравнение полученных данных в исследованных объектах показало, что в озерах, находившихся в непосредственной близости к Белому морю на островах Большом Соловецком и Оленьем,

концентрация АОГ в три и более раз выше, чем в удаленных от моря озерах, расположенных на территории Каргопольского и Коношского районов.

Закключение

Результаты рекогносцировочных исследований свидетельствуют о том, что содержание ГОС в воде озер, расположенных в субарктической климатической зоне, с различной удаленностью от Белого моря и антропогенной нагрузкой индивидуально для каждого объекта. Климатические условия могут как способствовать накоплению ГОС в компонентах окружающей среды, так и препятствовать ему, что впоследствии влияет на концентрацию органогамогенов в водных объектах. Средние значения концентрации АОГ в воде пресных озер на островах Большом Соловецком и Оленьем выше в 3 и более раз, чем в озерах, удаленных от моря,

на территории Каргопольского и Коношского районов Архангельской области.

Безусловно, для понимания механизмов формирования, а также межгодовой и сезонной изменчивости концентрации АОГ в водных объектах необходимы комплексные долгосрочные исследования, которые позволят осуществить грамотный подход в формировании природоохранных законодательных мер в отношении параметра АОГ.

Литература

Беспалая Ю. В., Болотов И. Н. Локальные фауны моллюсков Европейского Севера России: озера острова Большой Соловецкий // Вестник Поморского университета. 2006. Т. 2, № 10. С. 36–46.

Карпович В. Н. Кандалакшский заповедник. Мурманск: Мурман. кн. изд-во, 1984. 158 с.

Королева Т. А., Вельямидова А. В., Колпакова Е. С. Интегральный параметр контроля качества воды – концентрация адсорбируемых галогенорганических соединений // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27, № 8. С. 36–41. doi: 10.18412/1816-0395-2023-8-36-41

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

Нинбург Е. А. Долгая губа: изоляция естественная и искусственная // Природа. 1990. № 7. С. 44–49.

Отчет. Гидролого-гидрохимические исследования озер Б. Соловецкого острова / Под ред. Н. Л. Фроловой, Л. Е. Жидаревой. М.: СГИАПМЗ, 1989. 64 с.

Пантюлин А. Н., Краснова Е. Д. Отделяющиеся водоемы Белого моря: новый объект для междисциплинарных исследований // Геология морей и океанов: Мат-лы XIX Междунар. науч. конференции (школы) по морской геологии (Москва, 14–18 нояб. 2011 г.). М., 2011. Т. 3. С. 241–245.

Чуднов К. П. Глубокая губа и ее особенности // Соловецкие острова. 1926. № 2–3. С. 159–170.

Чупакова А. А., Чупаков А. В., Широкова Л. С., Забелина С. А., Морева О. Ю., Неверова Н. В. Биогенные элементы в водных объектах заболоченных ландшафтов тундры и северной тайги (Архангельская область) // Труды Института биологии внутренних вод РАН: Мат-лы докл. полевого семинара (ИБВВ РАН, 7–10 сент. 2017 г.). Ярославль, 2017. Вып. 79. С. 289–292.

Ballschmiter K. Pattern and sources of naturally produced organohalogens in the marine environment: biogenic formation of organohalogens // Chemosphere. 2003. Vol. 52, no. 2. P. 313–324. doi: 10.1016/S0045-6535(03)00211-X

Bidleman T., Andersson A., Jantunen L., Kucklick J., Kylin H., Letcher R., Tysklind M., Wong F. Review of halogenated natural products in Arctic, Subarctic and Nordic ecosystems // Emerg. Contam. 2019. Vol. 5. P. 89–115. doi: 10.1016/j.emcon.2019.02.007

Chen B., Bu Y., Yang J., Nian W., Hao S. Methods for total organic halogen (TOX) analysis in water: past,

present, and future // Chem. Eng. J. 2020. Vol. 399(82). Art. 125675. doi: 10.1016/j.cej.2020.125675

Fuge R., Johnson C. C. Iodine and human health, the role of environmental geochemistry and diet, a review // Appl. Geochem. 2015. Vol. 63. P. 282–302. doi: 10.1016/j.apgeochem.2015.09.013

Gribble G. W. Naturally occurring organohalogen compounds – A comprehensive review // Progress in the Chemistry of Organic Natural Products. 2023. Vol. 121. P. 1–546. doi: 10.1007/978-3-031-26629-4_1

Leri A. C., Ravel B. Abiotic bromination of soil organic matter // Environ. Sci. Technol. 2015. Vol. 49, iss. 22. P. 13350–13359. doi: 10.1021/acs.est.5b03937

Lijuan J., Baoliang C. Natural origins, concentration levels, and formation mechanisms of organohalogens in the environment // Prog. Chem. 2017. Vol. 29, iss. 9. P. 1093–1114. doi: 10.7536/PC170563

Limoges A., Piazzola J., Yohia C., Rodier Q., Bruch W., Canepa E., Sagaut P. Study of the atmospheric transport of sea-spray aerosols in a coastal zone using a high-resolution model // Atmosphere. 2024. Vol. 15(6). Art. 702. doi: 10.3390/atmos15060702

Moore R. M. Marine sources of volatile organohalogens // The Handbook of Environmental Chemistry. 2003. Vol. 3. P. 85–101. doi: 10.1007/b10449

Yang J., Li J., Tan X., Li J., Croué J. P., Chen B. Insights into adsorbable organic halogen analysis: Two overlooked factors impacting water quality assessment // Sci. Total Environ. 2024. Vol. 928. Art. 172429. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.172429

Yu Z., Li Y. Marine volatile organic compounds and their impacts on marine aerosol – A review // Sci. Total Environ. 2021. Vol. 768. Art. 145054. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145054

Zhang B., Xian Q., Zhu J., Li A., Gong T. Characterization, DBPs formation, and mutagenicity of soluble microbial products (SMPs) in wastewater under simulated stressful conditions // Chem. Eng. J. 2015. Vol. 279. P. 258–263. doi: 10.1016/j.cej.2016.04.014

References

Ballschmiter K. Pattern and sources of naturally produced organohalogens in the marine environment: biogenic formation of organohalogens. *Chemosphere*. 2003;52(2):313–324. doi: 10.1016/S0045-6535(03)00211-X

Bespalaya Yu. V., Bolotov I. N. Local faunas of mollusks of the European North of Russia: lakes of Bolshoy Solovetsky Island. *Vestnik Pomorskogo universiteta = Bulletin of the Pomor University*. 2006;2(10):36–46. (In Russ.)

Bidleman T., Andersson A., Jantunen L., Kucklick J., Kylin H., Letcher R., Tysklind M., Wong F. A Review of halogenated natural products in Arctic, Subarctic and Nordic ecosystems. *Emerg. Contam.* 2019;5:89–115. doi: 10.1016/j.emcon.2019.02.007

Chen B., Bu Y., Yang J., Nian W., Hao S. Methods for total organic halogen (TOX) analysis in water: past, present, and future. *Chem. Eng. J.* 2020;399(82):125675. doi: 10.1016/j.cej.2020.125675

Chudnov K. P. Deep Bay and its features. *Solovetskie ostrova = Solovetsky Islands*. 1926;2–3:159–170. (In Russ.)

Chupakova A. A., Chupakov A. V., Shirokova L. S., Zabelina S. A., Moreva O. Yu., Neverova N. V. Nutrients in water bodies of wetland landscapes of tundra and Northern Taiga (Arkhangelsk Region). *Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod RAN: Mat-ly dokl. polevogo seminar (IBV RAN, 7–10 sent. 2017 g.) = Proceedings of the Institute of Biology of Inland Waters RAS: Proceed. of the field seminar (IBW RAS, Sept. 7–10, 2017)*. Yaroslavl; 2017. Iss. 79. P. 289–292. (In Russ.)

Frolova N. L., Zhidareva L. E. (eds.). Report. Hydrological and hydrochemical studies of lakes of the Bolshoy Solovetsky Island. Moscow: SGIAPMZ; 1989. 64 c. (In Russ.)

Fuge R., Johnson C. C. Iodine and human health, the role of environmental geochemistry and diet, a review. *Appl. Geochem.* 2015;63:282–302. doi: 10.1016/j.apgeochem.2015.09.013

Gribble G. W. Naturally occurring organohalogen compounds – A comprehensive review. *Progress in the Chemistry of Organic Natural Products.* 2023;121: 1–546. doi: 10.1007/978-3-031-26629-4_1

Karpovich V. N. Kandalaksha Nature Reserve. Murmansk: Murm. kn. izd-vo; 1984. 158 p. (In Russ.)

Koroleva T. A., Vel'yamidova A. V., Kolpakova E. S. Integral parameter of water quality control – concentration of adsorbed organohalogen compounds. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia.* 2023;27(8):36–41. (In Russ.). doi: 10.18412/1816-0395-2023-8-36-41

Krasnova E. D. Ecology of meromictic lakes of Russia. Coastal marine water bodies. *Vodnye resursy = Water Resources.* 2021;48(3):322–333. (In Russ.). doi: 10.31857/S0321059621030093

Leri A. C., Ravel, B. Abiotic bromination of soil organic matter. *Environ. Sci. Technol.* 2015;49(22): 13350–13359. doi: 10.1021/acs.est.5b03937

Lijuan J., Baoliang C. Natural origins, concentration levels, and formation mechanisms of organohalogen in the environment. *Prog. Chem.* 2017;29(9):1093–1114. doi: 10.7536/PC170563

Limoges A., Piazzola J., Yohia C., Rodier Q., Bruch W., Canepa E., Sagaut P. Study of the atmospheric transport of sea-spray aerosols in a coastal zone using a high-resolution model. *Atmosphere.* 2024;15(6):702. doi: 10.3390/atmos15060702

Moore R. M. Marine sources of volatile organohalogenes. *The Handbook of Environmental Chemistry.* 2003;3:85–101. doi: 10.1007/b 10449

Ninburg E. A. Long Bay: natural and artificial isolation. *Priroda = Nature.* 1990;7:44–49. (In Russ.)

Pantulin A. N., Krasnova E. D. Separating reservoirs of the White Sea: a new object for interdisciplinary research. *Geologiya morei i okeanov: Mat-ly XIX Mezhdunar. nauch. konferentsii (shkoly) po morskoi geologii (Moskva, 14–18 noyab. 2011 g.) = Geology of the seas and oceans: Proceed. of the XIX int. scientific conf. (school) on marine geology (Moscow, Nov. 14–18, 2011)*. Moscow; 2011. Vol. 3. P. 241–245. (In Russ.)

Yang J., Li J., Tan X., Li J., Croué J. P., Chen B. Insights into adsorbable organic halogen analysis: Two overlooked factors impacting water quality assessment. *Sci. Total Environ.* 2024;928:172429. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.172429

Yu Z., Li Y. Marine volatile organic compounds and their impacts on marine aerosol-A review. *Sci. Total Environ.* 2021;768:145054. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145054

Zhang B., Xian Q., Zhu J., Li A., Gong T. Characterization, DBPs formation, and mutagenicity of soluble microbial products (SMPs) in wastewater under simulated stressful conditions. *Chem. Eng. J.* 2015;279:258–263. doi: 10.1016/j.jes.2016.04.014

Поступила в редакцию / received: 14.07.2025; принята к публикации / accepted: 30.01.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Королева Татьяна Алексеевна

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

e-mail: tataak@mail.ru

Вахрамеева Елена Анатольевна

научный сотрудник

e-mail: vakhr-elena@yandex.ru

Коробицына Римма Дмитриевна

младший научный сотрудник

e-mail: rimma.korobitsyna@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Koroleva, Tatiana

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher

Vakhrameeva, Elena

Researcher

Korobitsyna, Rimma

Junior Researcher