

УДК 502.17

ХЛОРООРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В ЭКОСИСТЕМАХ МАЛЫХ ОЗЕР БАССЕЙНА БЕЛОГО МОРЯ (КАНДАЛАКШСКИЙ ЗАЛИВ)

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

*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, распределении и компонентном составе хлорорганических соединений (хлорфенольных соединений и хлорированных бензолов), включая устойчивые, в экосистемах водоемов на разной стадии отделения от Белого моря. Проведены рекогносцировочные обследования на примере малых озер, расположенных на острове Оленьем в Кандалакшском заливе Белого моря (Мурманская область): пресного озера Банное (Малые Хрусломены) и меромиктического соленого озера Большие Хрусломены. Особенностью этих водоемов является связь с морем в прошлом и/или настоящем. Определение концентраций индивидуальных хлорорганических соединений проводили методом газовой хроматографии с электрозахватным детектированием. Выявлено присутствие в озерных осадках и почвах водосборных территорий хлорированных бензолов и хлорфенольных соединений, в том числе из группы стойких органических загрязнителей. Содержание стойких органических загрязнителей в донных осадках выявлено на уровне от 0,1 до 17,2 нг/г, в почвах – от < 0,1 до 11,8 нг/г. Хлорфенольные соединения в донных осадках определены в количествах от 0,022 до 0,256 мкг/г, в почвах – от 0,022 до 0,058 мкг/г. Показано, что компонентный состав и уровни хлорорганических соединений в донных осадках обследованных озер и почвах водосборных территорий обусловлены преимущественно природными источниками их образования при менее существенном вкладе источников, связанных с антропогенной деятельностью. Поступление стойких органических загрязнителей в почвы и озерные осадки обусловлено в основном атмосферным переносом от источников, связанных с процессами сжигания/горения различного вида органического сырья и отходов. Состав хлорфенольных соединений в донных осадках и почвах был представлен низкохлорированными фенолами и их производными и свидетельствовал о влиянии морских вод на протекание процессов трансформации хлорорганических соединений.

Ключевые слова: малые озера; Кандалакшский залив; Белое море; донные осадки; почвы; стойкие органические загрязнители; хлорфенольные соединения; газовая хроматография

Для цитирования: Колпакова Е. С., Вельямидова А. В. Хлорорганические соединения в экосистемах малых озер бассейна Белого моря (Кандалакшский залив) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 4. С. 25–32. doi: 10.17076/lim2140

E. S. Kolpakova*, A. V. Velyamidova. ORGANOCHLORINE COMPOUNDS IN SMALL LAKE ECOSYSTEMS OF THE WHITE SEA BASIN (KANDALAKSHA BAY)

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

This article presents data on the concentrations, distribution, and composition of organochlorine compounds (chlorinated benzenes and chlorophenolic compounds), including persistent organochlorine pollutants, in the ecosystems of waterbodies at different stages of isolation from the White Sea. Reconnaissance studies were conducted using the example of small lakes located on Oleniy Island in the Kandalaksha Bay of the White Sea (Murmansk Region): the freshwater Lake Bannoye (Lake Malye Khruslomeny) and the meromictic salt Lake Bol'shiye Khruslomeny. A notable feature of these waterbodies is their connection with the sea in the past and/or present. The concentrations of individual organochlorine compounds were determined by gas chromatography with electron capture detection. The presence of chlorinated benzenes and chlorophenolic compounds, including those from the persistent organic pollutants category, was revealed in lake sediments and soils of the catchment areas. The concentrations of persistent organic pollutants varied from 0.1 to 17.2 ppb in bottom sediments, and from < 0.1 to 11.8 ppb in soils. The concentrations of chlorophenolic compounds were from 0.022 to 0.256 ppm in sediments, and from 0.022 to 0.058 ppm in soils. It was shown that the composition and concentrations of organochlorine compounds in sediments of the lakes and soils of their catchment areas are mainly governed by the natural formation sources of these compounds with a less significant contribution of sources associated with anthropogenic activity. The input of persistent organic pollutants into soils and lake sediments is mainly due to air-borne transport from emission sources associated with the combustion/burning of various types of organic raw materials and wastes. The composition of chlorophenolic compounds in the lake sediments and soils was represented by low-chlorinated phenols and their derivatives, and indicated the influence of seawater on the transformation of organochlorine compounds.

Keywords: small lakes; Kandalaksha Bay; White Sea; sediments; soils; persistent organic pollutants; chlorophenolic compounds; gas chromatography

For citation: Kolpakova E. S., Velyamidova A. V. Organochlorine compounds in small lake ecosystems of the White Sea basin (Kandalaksha Bay). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 25–32. doi: 10.17076/lim2140

Введение

Экосистемы Арктики и Субарктики отличаются слабой устойчивостью к различного вида воздействиям и крайне медленной скоростью восстановления. В настоящее время антропогенная нагрузка на акваторию и береговую зону Белого моря постоянно увеличивается [Wania, 2003]. Большую проблему по-прежнему представляет загрязнение природных экосистем этих северных территорий хлорорганическими соединениями (ХОС), в частности хлорсодержащими стойкими органическими загрязнителями (СОЗ), поступающими в результате как глобального переноса от удаленных, так и от местных источников их эмиссии [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. 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 районы, значительно удаленные от первоначальных источников [Wania, Mackay, 1995; AMAP..., 2018]. Считается, что негативное воздействие СОЗ на биоту и человека в условиях холодного климата северных территорий сильнее, чем в низких широтах [Wania, 2003], поскольку происходит их накопление/консервация в компонентах наземных и водных экосистем (почвах, донных отложениях, снежном покрове, толще льда) и биоусиление воздействия. При поступлении в водоем такие

вещества способны аккумулироваться в гидробионтах и передаваться по пищевой цепи, увеличивая свою концентрацию в каждом последующем звене, а также сорбироваться частицами органического вещества и попадать в донные отложения.

Присутствие хлорорганических соединений, их происхождение и накопление ранее связывали главным образом с техногенными факторами, однако к настоящему времени достоверно установлено, что образование ХОС происходит вследствие таких естественных процессов, как хлорирование органического вещества при взаимодействии с хлорид-ионами и ферментативное продуцирование [Gribble, 2004]. Одним из крупных биогенных источников ХОС являются морские экосистемы, где основная роль в их продуцировании принадлежит бурым и диатомовым водорослям, планктону, цианобактериям и пр.; в пресноводных водоемах активными продуцентами выступают диатомовые, зеленые и сине-зеленые водоросли. Наряду с естественным продуцированием (например, диатомовыми водорослями, планктоном, цианобактериями и пр.) в природных экосистемах протекают еще и биохимические процессы преобразования ХОС, 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].

Белое море относится к внутренним морям Северного Ледовитого океана. Гляциоизостатическое и неотектоническое поднятие его береговой зоны приводит к постепенному отделению небольших водоемов [Romanenko, Shilova, 2012], в которых формируется уникальный гидролого-гидрохимический режим, обусловленный морфометрическими характеристиками, особенностями водообмена, соотношением поступающих объемов пресной и морской воды. Эти факторы определяют развитие водоема в направлении осолонения, опреснения или формирования меромиктической структуры. В процессе отделения водоема происходят значительные изменения водной биоты: морскую биоту сменяет комплекс видов, способных обитать в широком диапазоне солености воды, а также в пресноводной среде. Таким образом, подобные прибрежные водоемы, находящиеся на разных стадиях отделения от моря, являются уникальными объектами для изучения особенностей поведения хлорорганических соединений, в том числе стойких хлорорганических загрязнителей.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны малые озера (Банное и Большие Хрусломены), расположенные на острове Оленьем в Кандалакшском заливе Белого моря (рис. 1). Остров имеет естественное происхождение и является вторым по величине в Кандалакшском заливе. На юго-западе Оленьего имеются небольшие озера, в окрестности острова расположено множество небольших островов, округа богата лесом. В районе о. Оленьего достаточно глубокое морское побережье, защищенное от ветров, удобное для погрузки пиломатериалов на большие суда. В прошлом в ходе хозяйственного освоения территории расположенные рядом маленькие острова были объединены с о. Оленьим засыпкой мелководья опилками, досками, рейками и пр. При строительстве на острове крупного лесопильного завода (в конце XIX в.) возникла проблема обеспечения оборудования пресной водой. С этой целью проходы в заливах Малые и Большие Хрусломены, а также мелководье в районе залива Малые Хрусломены были завалены (укреплены) камнями – таким образом заливы были изолированы от моря и искусственно сформированы озера. Озеро Малые Хрусломены (современное название Банное) при этом постоянно использовалось как хранилище/источник пресной воды для технических целей. В то же время оз. Большие Хрусломены никогда не использовалось для каких-либо хозяйственных целей, поскольку практически сразу после отделения его от моря здесь стала развиваться меромиктическая структура из-за большой глубины озера и постоянной связи с морем через небольшой ручей.

Озеро Большие Хрусломены – меромиктическое с постоянным поступлением морских вод через проницаемые породы, имеет четко выраженную стратификацию; глубина озера достигает 21 м [Savichev et al., 2019]. Особенностью оз. Большие Хрусломены является его изоляция от моря искусственной валунной дамбой, которая ограничивает поступление воды из моря во время прилива и питание пресной водой за счет осадков и с водосбора. Озеро подвержено приливно-отливным течениям, в процессе которых морская вода переливается через дамбу, поступает в мелководную часть озера, где смешивается с опресненной водой верхних слоев, благодаря чему соленость наиболее опресненного слоя в озере поддерживается на уровне 6,5–7,3 г/л [Savichev et al., 2020]. В настоящее время поверхностный слой воды до глубины 2 м опреснен, под ним находится пикно-, гало- и хемоклин, основная

толща с глубины 4 м соленая, самый нижний слой мониомлимиона имеет морскую соленость и очень высокое содержание сероводорода (~500–600 мг/л) и метана (~30 мг/л) [Лосюк и др., 2019; Savvichev et al., 2020]. Озеро окружают каменистые берега, затем лесной массив хвойных и лиственных деревьев. Низкая и узкая перемычка, отделяющая оз. Большие Хрусломены от расположенного рядом оз. Банного, не исключает проникновение из последнего биогенных соединений, стимулирующих развитие водорослей и цианобактерий. Таким образом, в оз. Большие Хрусломены создается стабильное равновесие гидрохимических параметров, основанное на динамическом уравновешивании естественных процессов опреснения и заболачивания (за счет затрудненного водообмена с морем и поступления биогенных веществ с поверхностным стоком) и постоянного притока соленой морской воды (разбавляющей и обновляющей поверхностный слой). В озере произошло быстрое развитие застойных процессов по сравнению с водоемами, отделяющимися естественным путем за счет

поднятия суши. В нижних слоях озерной воды накопился сероводород и сформировалась устойчивая стратификация с развитием сообщества АФБ в освещенной зоне хемоклина [Lupina et al., 2003].

Озеро Банное, более 100 лет назад полностью изолированное от моря, является пресным водоемом; глубина озера достигает 5 м. Рядом с оз. Банным расположен поселок Лесозаводской. Население поселка малочисленно: в зимний период здесь проживает около 90 человек, в летний – чуть более 300. Промплощадка лесопильного завода (как потенциальный локальный источник загрязнения в прошлом) находится на отдалении от обследованных озер, на противоположной стороне жилого поселка. На данный момент лесопильный завод уже длительное время не функционирует, какое-либо другое промышленное производство также отсутствует. Карта-схема расположения исследуемых озер приведена на рис. 1.

Отбор образцов донных осадков и почв проводился сотрудниками лаборатории экоаналитических исследований ФГБУН ФИЦКИА РАН

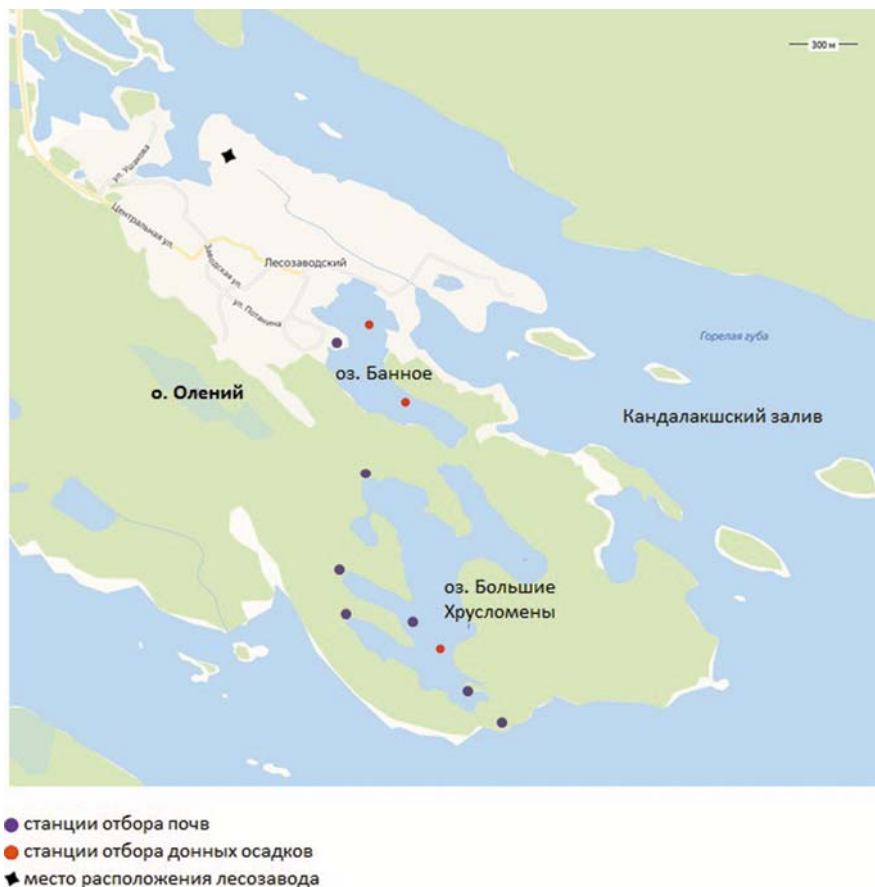


Рис. 1. Карта-схема расположения исследованных озер

Fig. 1. Schematic map of the studied lakes

в ходе экспедиционных работ в марте 2019 и 2021 гг. и в июле 2024 г. Образцы донных осадков в оз. Большие Хрусломены были отобраны в наиболее глубокой части акватории озера. В оз. Банном осадки отбирались на двух станциях: глубоководной (станция 1) и вблизи поселка (станция 2). Для отбора донных осадков использовали дночерпатель Экмана-Берджа и ударную прямоточную грунтовую трубку Aquatic Research Instruments (США) с внутренним диаметром 50 мм, длиной 60 см. Длина керн осадков составляла 15 см. Образцы осадков сразу после отбора помещались в полиэтиленовые пакеты, из которых отжимался воздух для предотвращения окисления осадков.

Образцы почв на водосборной территории озер отбирали в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84. Поскольку данная территория каменистая, максимально возможная глубина отбора образцов почв не превышала 30 см.

В качестве целевых хлорорганических соединений были выбраны гексахлорбензол (ГХБ), пентахлорбензол (ПеХБ), пентахлорфенол (ПХФ) и пентахлоранизол (ПХА) из группы стойких органических загрязнителей, а также хлорфенольные соединения (ХФС).

Для извлечения индивидуальных соединений использовался метод ускоренной жидкостной проточной экстракции воздушно-сухой пробы донных осадков горячей смесью органических растворителей (гексан : ацетон) в соотношении 3:1, при температурах ниже точки кипения.

Полученный экстракт обрабатывали 0,2 н раствором гидроксида натрия (NaOH) для разделения кислых (ХФС) и нейтральных (ГХБ, ПеХБ и ПХА) соединений. Выделенную органическую фазу, содержащую соединения нейтрального характера, очищали от сопутствующих органических примесей многократной обработкой концентрированной серной кисло-

той (в случае донных осадков) или методом адсорбционной колоночной хроматографии с использованием многослойных колонок (в случае почв) с последующей идентификацией и количественным определением методом газовой хроматографии.

Определение концентраций ХФС (хлорированных фенолов и их производных) в легко- и трудноэкстрагируемых фракциях проводили в соответствии со стандартом ISO 14154:2005 методом газовой хроматографии. Для извлечения фракции легкоэкстрагируемых ХФС щелочной раствор соединений кислого характера реэкстрагировали гексаном. Остаток анализируемого образца донных осадков и почв после экстракции обрабатывали 10 М раствором NaOH, дополнительно выделяя фракцию трудноэкстрагируемых ХФС. Выделенные из каждой фракции хлорфенольные соединения дериватизировали уксусным ангидридом в слабощелочной среде.

Количественное определение и идентификацию ХОС проводили методом капиллярной газовой хроматографии с электронозахватным детектированием. Все концентрации даны в расчете на воздушно-сухой осадок. Нижний предел обнаружения индивидуальных ХОС – 0,0001 мкг/г (0,1 нг/г). Все концентрации представлены в расчете на воздушно-сухую пробу.

Результаты и обсуждение

Стойкие органические загрязнители (ГХБ, ПеХБ, ПХФ, ПХА) выявлены в донных осадках исследованных озер и в почвах на их водосборных территориях практически повсеместно.

В донных осадках концентрации СОЗ варьировали от < 0,1 до 17,2 нг/г с наибольшими значениями в осадках оз. Большие Хрусломены (табл.).

Содержание ХОС в донных осадках и почвах на водосборных территориях исследованных озер
Content of organochlorine compounds (OCs) in bottom sediments and soils in the catchment areas of the studied lakes

ХОС OCs	Донные осадки Bottom sediments		Почвы Soils	
	оз. Большие Хрусломены Lake Bol'shiye Khruslomeny	оз. Банное Lake Bannoye	оз. Большие Хрусломены Lake Bol'shiye Khruslomeny	оз. Банное Lake Bannoye
ГХБ, нг/г НСВ, ppb	9,1–17,2	2,4–8,4	0,6–11,8	10,1
ПеХБ, нг/г РеСВ, ppb	0,6–1,4	0,2–0,7	<0,1–1,7	0,7
ПХФ, нг/г РСР, ppb	8,5–12,7	0,1–0,3	1,2–11,1	5,8
ПХА, нг/г РСА, ppb	0,1–0,2	<0,1	<0,1–1,1	не обнаружено not found
ХФС, мкг/г СРс, ppm	0,206–0,256	0,022–0,060	0,22 – 0,058	0,058

В озерных осадках в порядке убывания концентраций СОЗ располагались следующим образом: ГХБ ~ ПХФ > ПеХБ > ПХА в осадках оз. Большие Хрусломены и ГХБ > ПХФ ~ ПеХБ > ПХА в осадках оз. Банного (на двух станциях отбора донных осадков). В обоих случаях среди всех загрязняющих веществ в донных осадках преобладал ГХБ (2,4–17,2 нг/г), невысокими были концентрации ПеХБ (0,2–1,4 нг/г) и совсем незначительными – ПХА (не более 0,2 нг/г). В то же время практически на том же уровне, что и ГХБ, был определен ПХФ (от 0,1 до 12,7 нг/г). В большинстве своем в распределении загрязняющих веществ в осадках прослеживалась выраженная тенденция к снижению концентраций по глубине, тогда как вертикальное распределение ПХФ имело более равномерный характер. В соответствии с классификацией норвежских стандартов качества донных осадков [Pettersen, 2016] выявленные концентрации индивидуальных СОЗ в озерных осадках можно считать довольно низкими.

В почвах на водосборных территориях исследованных озер концентрации СОЗ оказались сопоставимы с найденными в донных осадках – от < 0,1 до 11,8 нг/г, при этом какая-либо явная закономерность в их пространственном распределении отсутствовала (табл.).

Аналогичным образом доминирующими загрязняющими веществами были ГХБ и ПХФ при незначительном содержании ПеХБ и ПХА.

Учитывая расположение озер и тот факт, что в настоящее время эти водоемы и их водосборные территории испытывают сравнительно слабую антропогенную нагрузку, поступление СОЗ в донные осадки и почвы в большей степени обусловлено атмосферным переносом (локальным, региональным и трансграничным) от источников, преимущественно связанных с процессами сжигания/горения различного вида органического сырья и отходов (например, бытовых и промышленных отходов, биомассы, всех видов топлива).

Содержание ХФС в донных осадках соленого оз. Большие Хрусломены оказалось на порядок выше по сравнению с осадками пресного оз. Банного – 0,206–0,256 и 0,022–0,060 мкг/г соответственно (табл.).

Компонентный состав ХФС в осадках оз. Большие Хрусломены представлен только хлорированными фенолами разной степени замещения, производные хлорфенолов в осадках не найдены. В составе ХФС в осадках оз. Большие Хрусломены (рис. 2) преобладали (47,2 %) монохлорфенолы, источниками которых являются природные процессы образования, такие

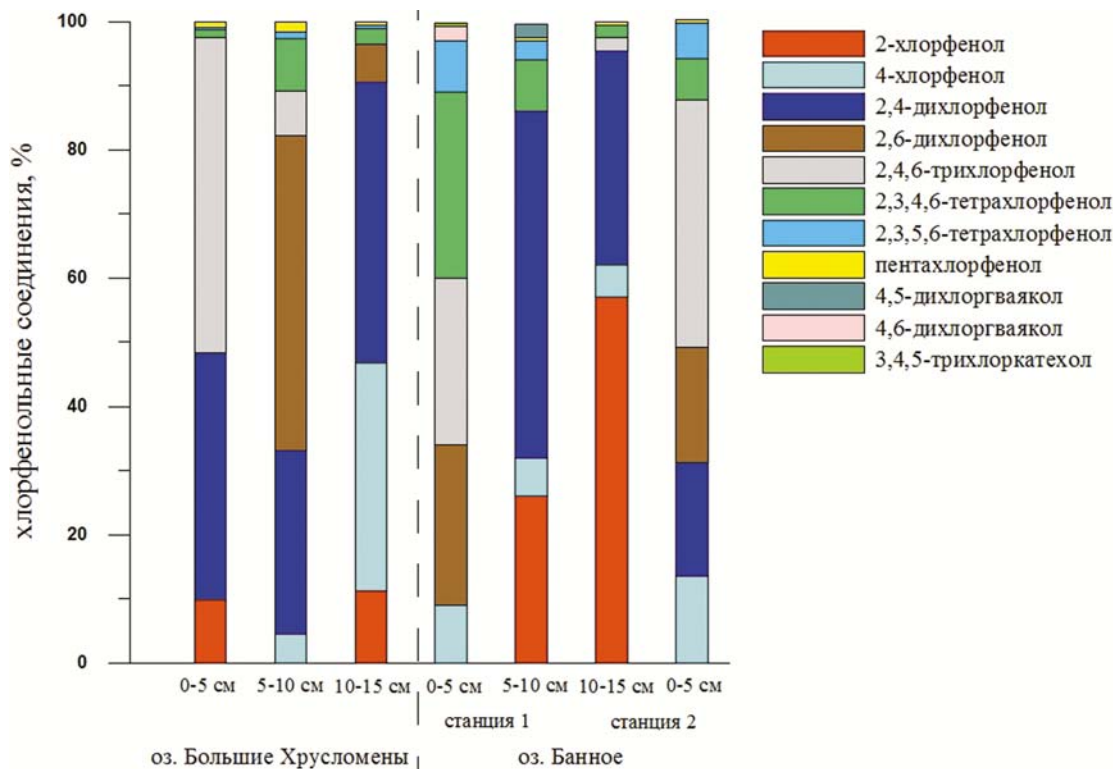


Рис. 2. Компонентный состав ХФС в осадках исследованных озер
 Fig. 2. Component composition of CPs in sediments of the studied lakes

как ферментативное продуцирование [Gribble, 2004]. Вклад антропогенного ПХФ в сумму ХФС при этом составлял всего 4,1–5,3 %. Идентифицированные ХФС были определены в основном в трудноэкстрагируемой фракции, в небиодоступном для микробной деградации состоянии, что способствует их накоплению в осадках. Морские воды не благоприятствуют активности микробных сообществ, участвующих в процессах деградации/трансформации хлорорганических соединений [Field, Sierra-Alvarez, 2007]. Данные соединения могут быть природными метаболитами, образующимися в окружающей среде в результате энзиматических процессов [Gribble, 2023].

В осадках оз. Банного, наряду с хлорфенолами, определены еще их производные (рис. 2). ХФС были обнаружены в основном в легкоэкстрагируемой фракции, в биодоступном для микробной деградации состоянии. Доля трудноэкстрагируемых ХФС составляла в среднем 32,6 %. Состав ХФС в осадках оказался шире: наряду с хлорфенолами присутствовали еще их производные. В наибольших количествах выявлены моно- и дихлорфенолы. Из производных хлорфенолов найдены хлорированные метоксифенолы, что свидетельствовало об активном протекании в озере процессов трансформации ХОС [Field, Sierra-Alvarez, 2007].

При изучении компонентного состава ХФС в почвах выявлено присутствие как хлорированных фенолов, так и их производных.

В почвах водосборной территории оз. Банного ХФС составляли 0,146 мкг/г. В компонентном составе основная доля (70 %) приходилась на трихлорфенолы. Производные ХФ в общем содержании не превышали 1,3 %. ПХФ составлял 10 % от общего количества.

В образцах почв на водосборной территории оз. Большие Хрусломены содержание ХФС определено в интервале от 0,022 до 0,058 мкг/г. В их составе доминировали (более 50 %) низкохлорированные соединения, главным образом ди- и трихлорфенолы. Антропогенные тетрахлорфенолы и ПХФ найдены в более высоких концентрациях по сравнению с почвами территории озера Банного. Вклад таких соединений в содержание ХФС составлял от 5 до 38 %, что свидетельствует об антропогенной нагрузке на экосистему озера Большие Хрусломены. ХФС присутствовали как в легко-, так и в трудноэкстрагируемых фракциях.

Производные хлорфенолов не превышали 8 % в общем составе ХФС. Среди производных хлорфенолов в наибольших концентрациях определены хлоркатехолы (хлорированные гидроксифенолы).

Заключение

При исследовании экосистем малых озер, в разной степени изолированных от Белого моря, в донных осадках и почвах водосборных территорий отмечено присутствие ХОС, в том числе стойких органических загрязнителей. Компонентный состав этих соединений представлен высокохлорированными бензолами и хлорфенольными соединениями. Поступление СО₂ в донные осадки и почвы в настоящее время обусловлено преимущественно локальным, региональным и трансграничным атмосферным переносом. Состав ХФС в озерных осадках свидетельствовал о влиянии морских вод на протекание процессов трансформации хлорорганических соединений.

Литература

- Лосюк Г. Н., Краснова Е. Д., Кокрятская Н. М., Воронов Д. А. Основные гидрологические параметры озера Большие Хрусломены (Кандалакшский залив Белого моря) // География: развитие науки и образования: Кол. моногр. по мат-лам Всерос. с междунар. участием науч.-практ. конференции (Санкт-Петербург, 18–21 апреля 2019 г.). СПб., 2019. С. 334–336.
- AMAP assessment: biological effects of contaminants on Arctic wildlife and fish // Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo, Norway, 2018. 96 p.
- Field J. A., Sierra-Alvarez R. Biodegradability of chlorinated aromatic compounds. Science dossier // Euro Chlor. 2007. P. 15–33.
- Gribble G. W. Natural organohalogenes. Science dossier // Euro Chlor. 2004. 60 p.
- Gribble G. W. Naturally occurring organohalogen compounds – a comprehensive review // Naturally Occurring Organohalogen Compounds. 2023. Vol. 121. P. 1–546. doi: 10.1007/978-3-031-26629-4_1
- Lunina O. N., Grouzdev D. S., Patsaeva S. V., Zhiltsova A. A., Suzina N. E., Krasnova E. D., Voronov D. A., Kokryatskaya N. M., Veslopolova E. F., Savvichev A. S. Anoxygenic phototrophic bacteria of the meromictic Lake Bol'shie Khruslomeny (Oleniy Island, Kandalaksha Gulf, Murmansk Oblast, Russia) // Microbiology. 2023. Vol. 92, no. 6. P. 564–580. doi: 10.31857/S0026365623600268
- Pettersen R. Grenseverdier for klassifisering av vann, sediment og biota (Quality standards for water, sediment and biota) // Miljødirektoratet basert på bakgrunnsdata fra Aquateam. 2016. 13 p.
- Romanenko F. A., Shilova O. S. The postglacial uplift of the Karelian coast of the White Sea according to radiocarbon and diatom analyses of lacustrine-boggy deposits of Kindo Peninsula // Doklady Earth Sciences. 2012. Vol. 442, no. 2. P. 242–246.
- Savvichev A. S., Kallistova A. Y., Rusanov I. I., Pimenov N. V., Kadnikov V. V., Ravin N. V., Voronov D. A., Krasnova E. D. Light-dependent ethane oxidation is the major process of the methane cycle

in the water column of the Bol'shie Khruslomeny polar lake // *Microbiology*. 2019. Vol. 88, no. 3. P. 367–371. doi: 10.1134/S002626171903010X

Savichev A. S., Kadnikov V. V., Rusanov I. I., Kallistova A. Y., Veslopolova E. F., Zakharova E. E., Sigalevich P. A., Pimenov N. V., Kadnikov V. V., Beletsky A. V., Mardanov A. V., Ravin N. V., Krasnova E. D., Voronov D. A., Kokryatskaya N. M., Losyuk G. N., Demidenko N. A., Belyaev N. A. Microbial processes and microbial communities in the water column of the Polar meromictic Lake Bol'shie Khruslomeny at the White Sea coast // *Front. Microbiol.* 2020. Vol. 11. P. 1945. doi: 10.3389/fmicb.2020.01945

Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs). Revised in 2023. Text and Annexes // UNEP Chemicals [Электронный ресурс]. 2024. 83 p. URL: <https://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx> (дата обращения: 20.09.2024).

Wania F., Mackay D. A global distribution model for persistent organic chemicals // *Sci. Total Environ.* 1995. Vol. 160. P. 211–232. doi: 10.1021/es962399q

Wania F. Assessing the potential of persistent organic chemicals for long-range transport and accumulation in polar region // *Environ. Sci. Technol.* 2003. Vol. 37, no. 7. P. 1344–1351.

References

AMAP assessment: biological effects of contaminants on Arctic wildlife and fish. *Arctic Monitoring and Assessment Programme*. Oslo, Norway; 2018. 96 p.

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

Gribble G. W. Natural organohalogenes. Science dossier. *Euro Chlor*. 2004. 60 p.

Gribble G. W. Naturally occurring organohalogen compounds – a comprehensive review. *Naturally Occurring Organohalogen Compounds*. 2023;121:1–546. doi: 10.1007/978-3-031-26629-4_1

Losyuk G. N., Krasnova E. D., Kokryatskaya N. M., Voronov D. A. Main hydrological parameters of Lake Bol'shiye Khruslomeny (Kandalaksha Bay of the White Sea). *Geografiya: razvitie nauki i obrazovaniya: Kol. monografiya po materialam Vseros. s mezhdunar. uchastiem nauch.-prakt. konf. (Sankt-Peterburg, 18–*

21 aprelya 2019 g.) = Geography: development of science and education: Collective monograph on materials of the annual All-Russian with the int. part., scientific and practical conf. (St. Petersburg, April 18-21, 2019). St. Petersburg; 2019. P. 334–336. (In Russ.)

Lunina O. N., Grouzdev D. S., Patsaeva S. V., Zhiltsova A. A., Suzina N. E., Krasnova E. D., Voronov D. A., Kokryatskaya N. M., Veslopolova E. F., Savichev A. S. Anoxygenic phototrophic bacteria of the meromictic Lake Bol'shie Khruslomeny (Oleniy Island, Kandalaksha Gulf, Murmansk Oblast, Russia). *Microbiology*. 2023;92(6): 564–580. doi: 10.31857/S0026365623600268

Pettersen R. Grenseverdier for klassifisering av vann, sediment og biota (Quality standards for water, sediment and biota). *Miljødirektoratet basert på bakgrunnsdata fra Aquateam*. 2016. 13 p.

Romanenko F. A., Shilova O. S. The postglacial uplift of the Karelian coast of the White Sea according to radiocarbon and diatom analyses of lacustrine-boggy deposits of Kindo Peninsula. *Doklady Earth Sciences*. 2012;442(2):242–246.

Savichev A. S., Kallistova A. Y., Rusanov I. I., Pimenov N. V., Kadnikov V. V., Ravin N. V., Voronov D. A., Krasnova E. D. Light-dependent ethane oxidation is the major process of the methane cycle in the water column of the Bol'shie Khruslomeny polar lake. *Microbiology*. 2019;88(3):367–371. doi: 10.1134/S002626171903010X

Savichev A. S., Kadnikov V. V., Rusanov I. I., Kallistova A. Y., Veslopolova E. F., Zakharova E. E., Sigalevich P. A., Pimenov N. V., Kadnikov V. V., Beletsky A. V., Mardanov A. V., Ravin N. V., Krasnova E. D., Voronov D. A., Kokryatskaya N. M., Losyuk G. N., Demidenko N. A., Belyaev N. A. Microbial processes and microbial communities in the water column of the Polar meromictic Lake Bol'shie Khruslomeny at the White Sea coast. *Front. Microbiol.* 2020;11:1945. doi: 10.3389/fmicb.2020.01945

Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs). Revised in 2023. Text and Annexes. *UNEP Chemicals*. 2024. 83 p. URL: <https://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx> (accessed: 20.09.2024).

Wania F., Mackay D. A global distribution model for persistent organic chemicals. *Sci. Total Environ.* 1995;160:211–232. doi: 10.1021/es962399q

Wania F. Assessing the potential of persistent organic chemicals for long-range transport and accumulation in polar region. *Environ. Sci. Technol.* 2003;37(7):1344–1351.

Поступила в редакцию / received: 14.07.2025; принята к публикации / accepted: 12.02.2026.
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

CONTRIBUTORS:

Kolpakova, Elena

Researcher

Velyamidova, Anna

Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher