

Среда обитания водных биологических ресурсов

Исследование профиля конгенеров полихлорированных бифенилов в донных отложениях Баренцева моря

М.А. Новиков, Е.А. Горбачёва

Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича), ул. Академика Книповича, 6, г. Мурманск, 183038
E-mail: mnovik@pinro.ru

Цель работы: исследование различий в уровне содержания и профилях конгенеров ПХБ в донных отложениях отдельных районов Баренцева моря, причин, их обуславливающих, выявление основных источников загрязнения.

Материалом исследования послужили данные, собранные в ходе экспедиций «ПИНРО» им. Н.М. Книповича в Баренцевом море в период 2004–2019 гг.; всего обработаны пробы с 630 станций.

Используемые методы: содержание ПХБ определяли методом капиллярной газовой хроматографии на хромато-масс-спектрометре GCMS-QP2010 Plus «Shimadzu» (Япония). Данные обрабатывали с применением ГИС-технологий в среде приложения Arcview 3.2 (ESRI) и описательной статистики в среде MS Excel.

Результаты: выполнена и представлена карта загрязнения донных осадков Баренцева моря ПХБ. Изучен профиль конгенеров ПХБ₁₁ и ПХБ₁₂ в осадках из различных районов моря таких как район Кольского залива, шельф Шпицбергена, Центральная впадина, северо-восточная часть Баренцева моря. На специально подобранный группе станций (разрезе) прослежено изменение профиля конгенеров ПХБ в донных отложениях по мере удаления от источников загрязнения. Выявлены существенные отличия в профиле конгенеров ПХБ района Кольского залива от участка шельфа к юго-востоку от Шпицбергена и других исследованных районов. Показано характерное изменение состава конгенеров ПХБ при удалении от Шпицбергена. Основными источниками загрязнения донных отложений шельфа Шпицбергена ПХБ следует считать поступление загрязнения в результате таяния снега, фирна и ледников на арктических архипелагах, а также локальное загрязнение в заливах.

Практическая значимость: полученные результаты позволяют лучше понимать процессы, связанные с глобальным загрязнением экосистемы Баренцева моря, и оценить потенциальную опасность загрязнения ПХБ для донных промысловых гидробионтов.

Ключевые слова: Баренцево море, полихлорированные бифенилы, донные отложения, загрязнение, Шпицберген, Кольский залив.

Studies on the profile of polychlorinated biphenyls congeners in bottom sediments of the Barents Sea

Mikhail A. Novikov, Elena A. Gorbacheva

Polar branch of «VNIRO» (N.M. Knipovich «PINRO»), 6, Academician Knipovich St., Murmansk, 183038, Russia

This paper **aims** to study variations in the content and profiles of PCB congeners in the bottom sediments in some areas of the Barents Sea, the reasons for their formations, and to identify the main sources of pollution.

The material and methods: The data collected by the scientists of PINRO during the surveys in the Barents Sea from 2004 to 2019 was used to conduct the studies. Totally, samples from 630 stations were examined. The PCB content was detected by capillary gas chromatography using a Shimadzu GCMS-QP2010 Plus chromatograph mass spectrometer (Japan). The data were processed with GIS-technologies using Arcview 3.2 (ESRI) and MS Excel descriptive statistics.

Results: A chart showing the contamination of bottom sediments with PCB in the Barents Sea was compiled and presented. We studied the profile of PCB11 and PCB12 congeners in sediments that were taken from different marine areas, particularly the Kola Bay, the Spitsbergen shelf, the Eastern (Central) Basin and the northeastern Barents Sea. In a number of stations that were chosen for the survey (i. e. the section), we made observations on variations in the profile of PCB congeners in bottom sediments as the distance to the sources of pollution increased. We identified considerable variations in the PCB congeners'profile in the Kola Bay area from the shelf area to the southeast of Spitsbergen and other investigated areas. The paper shows a salient variation in the composition of PCB congeners with increasing distance from Spitsbergen. The pollution caused by melting of snow, firn and glaciers in the Arctic archipelagos, as well as local pollution in the bays should be considered as the main sources of pollution of bottom sediments with PCBs in the Spitsbergen shelf.

Practical relevance: The obtained results will contribute to a better understanding of the processes related to the global pollution of the Barents Sea ecosystem and an assessment of the potential hazard of PCB pollution for demersal commercial marine species.

Keywords: Barents Sea, PCBs, bottom deposits, pollution, Spitsbergen, Kola bay.

ВВЕДЕНИЕ

Полихлорированные бифенилы (ПХБ) относятся к стойким органическим загрязнителям, отличающимся высокой токсичностью и чрезвычайной устойчивостью в окружающей среде [Янин, 1997; АМАР, 2004]. Присутствие повышенного содержания ПХБ в донных отложениях (ДО) представляет потенциальную угрозу жизнедеятельности гидробионтов. Прежде всего, речь идёт об организмах бентоса, в той или иной степени питающихся грунтом, – грунтоедах, собирающих детритофагах и, отчасти, сестонофагах. К числу таких видов бентоса можно отнести важных в промысловом отношении креветок *Pandalus borealis* и имеющих существенное кормовое значение полихет *Brada inhabilis*, *B. granulosa*, *Maldanidae*, *Spiochaetopterus typicus*, морских ежей *Ctenodiscus crispatus* и др. Известно, что ПХБ отличаются высокой устойчивостью к разложению, распространяются на дальние расстояния, хорошо растворяются в жирах, плохо выводятся из организма и способны к концентрированию в пищевых цепях (биомагнификации) [АМАР, 2003]. ПХБ обладают высокой токсичностью для гидробионтов, вызывают гормональные нарушения, подавляют иммунную систему, негативно воздействуют на репродуктивную функцию, рост, эмбриональное развитие и т. д. [АМАР, 2003; Батоев и др., 2004]. ПХБ оказывают острое воздействие на водные организмы при концентрации выше 1 мкг/л, например, рыба гибнет при концентрации Арохлора-1254 5 мкг/л [Бродский и др., 2004].

Загрязнение донных отложений ПХБ происходит преимущественно за счёт осаждения взвеси. Загрязненная ПХБ взвесь поступает, главным образом, с терригенным стоком; также загрязнение взвеси может происходить непосредственно в воде, вследствие адсорбции [Чуйко и др., 2010; McGovern et al., 2022]. Взвесь переносится течениями на различные расстояния, постепенно оседая и аккумулируясь на поверхности ДО.

Ранее нами показано, что шельф вокруг архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа является областью повышенного загрязнения ДО гексахлорбензолом и ДДТ [Новиков, 2021]. Это связано с дальним трансграничным атмосферным переносом загрязнения хлорорганическими соединениями (ХОС) на поверхность островов, включая ледники, преимущественно из Западной Европы и Северной Америки. Это старое загрязнение, поскольку упомянутые ХОС, а также ПХБ были запрещены для производства в Западной Европе и Северной Америке много десятилетий назад. В частности, ПХБ ещё в 1966 г. [Zaborska et al., 2011]. По решению Стокгольмской конвенции

(2001 г.) ПХБ должны быть изъяты из эксплуатации до 2015 г. и уничтожены до 2025 г. Российская Федерация ратифицировала данный документ в 2011 г. [Запевалов, 2018].

Показано, что комбинированное влияние перемешивания донных отложений (< 0,1 см/год) и низкой скорости седиментации (< 0,1 мм/год) в западной части Баренцева моря, ограничивает точность оценки времени (хронологию) происходящих изменений концентраций загрязняющих веществ в толще осадков. В результате этого верхний слой осадка толщиной 2 см обычно содержит гомогенную смесь концентраций загрязняющих веществ за период примерно 50 лет [Carroll et al., 2008; Zaborska et al., 2008]. Приведённое выше замечание отражает тот факт, что взятая в море пробы донных отложений показывает не сиюминутную ситуацию, а накопленную информацию о современном уровне загрязнения за последние десятилетия.

Цель настоящей работы – исследование различий в уровне содержания и профилях конгенеров ПХБ в ДО отдельных районов Баренцева моря, анализ причин, их обуславливающих, и выявление основных источников загрязнения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Материалом для исследований служили пробы поверхностного слоя ДО (до 2 см), отобранные в морских экспедициях «ПИНРО» им. Н.М. Книповича» при изучении состояния морских биоресурсов и среды их обитания в 2004–2019 гг. Для отбора проб ДО использовали дночертатель Ван Вина с площадью захвата не менее 0,1 м². Каждая пробы сырого осадка помещалась в отдельные герметичные полиэтиленовые пакеты по 1 кг. Воздух из пакетов удаляли, после чего пробу подвергали заморозке при температуре минус 20 °С и хранили в темноте. Всего в период с 2004 по 2019 гг. было обработано 630 станций на содержание ПХБ, расположенных на всей акватории Баренцева моря. Уровни содержания ПХБ в ДО определялись в лаборатории химико-аналитических исследований ПИНРО.

Определение содержания ПХБ в пробах ДО выполняли по известной методике М-МВИ-09-97.¹ ПХБ из ДО экстрагировали смесью н-гексана и ацетона в отношении 3:1 на ультразвуковой бане в течение 30 мин. ПХБ – 11, реже 12 конгенеров с номерами по

¹ Методика выполнения измерений массовой доли полихлорированных бифенилов в почве и донных отложениях методами газовой хроматографии и хромато-масс-спектрометрии, НПО «Мониторинг», НИИ гигиены, профпатологии и экологии человека МЗМП РФ, св. № 2420/ 463-97/0463 от 20.06.97 (М-МВИ-09-97).

номенклатуре IUPAC: 28, 31, 52, 99, 101, 105, 118, 138, 153, 156, 180, 187 определяли методом капиллярной газовой хроматографии на хромато-масс-спектрометре GCMS-QP2010 Plus «Shimadzu» (Япония) с капиллярной кварцевой колонкой длиной 30 м. Идентификация индивидуальных соединений проводилась в режиме SIM (метод выбранных ионов). Для автоматической обработки результатов анализа применялась программа GCMSsolution 2.5 фирмы «Shimadzu». Полученные значения содержания отдельных конгенеров и суммы ПХБ (Σ ПХБ) выражали в нг/г сухой массы осадка.

Статистический анализ данных проводили в среде прикладного пакета программ MS Excel 2016. Картографирование, включая геостатистический анализ, выполняли в среде ГИС-приложения Arcview 3.2 (ESRI). В рамках акватории Баренцева моря выделяли и отдельно обрабатывали данные по станциям четырёх районов: шельфа Шпицбергена (юго-восточная часть, кол-во станций ($n=36$), Северо-Восточного ($n=53$), Центральной впадины ($n=28$) и Кольского залива ($n=32$). Под районом Кольского залива подразумевали прибрежную часть так называемого Западного Мурмана (к западу от устья залива) и его устье, подвергающиеся воздействию загрязнения непосредственно водных объектов материковым стоком (рис. 1). Границы районов

нов даны в соответствии с принятыми нами в предшествующем исследовании [Новиков, 2021].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Распространение содержания Σ ПХБ в осадках Баренцева моря относительно равномерное и наблюдается, в основном, в северной части его акватории и в прибрежной зоне Западного Мурмана (рис. 1). Наибольшие средние значения отмечены на Шпицбергенской банке, вблизи побережья Земли Франца-Иосифа и в районе Кольского залива. Среднее содержание Σ ПХБ в ДО района Кольского залива составляло 3,63 нг/г, что значительно превышало среднее значение по Баренцеву морю – 1,24 нг/г. На шельфе, расположенному к юго-востоку от Шпицбергена, включая Шпицбергенскую банку, среднее значение содержания Σ ПХБ в ДО составило 1,56 нг/г, в Центральной впадине 0,96 нг/г, а в северо-восточном районе Баренцева моря 1,25 нг/г. Приведённые уровни загрязнения согласно классификации Норвежского агентства по охране окружающей среды (SFT) находятся ниже фонового уровня (<5 нг/г) и не представляют угрозы для донных организмов [Bakke et al., 2007].

Подробный анализ распространения Σ ПХБ в ДО Баренцева моря выполнен нами в ранее опублико-

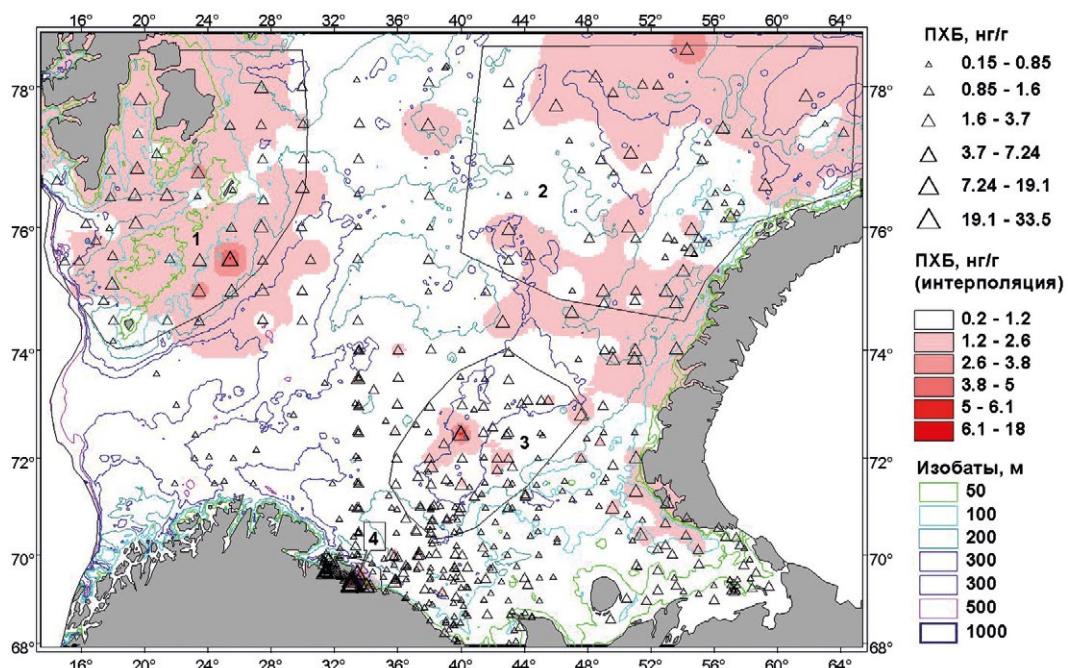


Рис. 1. Содержание суммы ПХБ в ДО Баренцева моря со станциями отбора проб и границами отдельно обработанных районов: 1 – шельфа Шпицбергена; 2 – Северо-Восточного; 3 – Центральной впадины (желоба); 4 – Кольского залива

Fig. 1. Total content of PCBs in bottom sediments from the Barents Sea including the sampling stations and boundaries of particularly investigated areas: 1 – Spitsbergen shelf; 2 – the northeastern Barents Sea; 3 – the Eastern (Central) Basin; 4 – the Kola Bay

ванном исследовании [Новиков, 2021]. В качестве основного источника распространения ПХБ в ДО моря нами рассматривается процесс таяния ледников на арктических архипелагах, Шпицбергене, Новой Земле, Земле Франца-Иосифа и многолетнего морского льда в северо-восточной части Баренцева моря, также возможно локальное загрязнение, например, с «кладбищ» старых кораблей в Кольском и других заливах побережья Западного Мурмана [Плотицына, 2009].

С целью оценки различий в происхождении загрязнения ПХБ, поступающего из разных источников, нами проанализирован состав, профили конгенеров ПХБ в ДО различных, отдалённых друг от друга районов Баренцева моря, приведённых на рис. 2.

Анализ профилей конгенеров, представленных на рис. 2, показывает, что за исключением ДО района Кольского залива, содержащих минимальное количество трихлобифенилов (3-ХБ, конгенеры 28 и 31), ПХБ-156 и максимальное ПХБ-52, остальные исследованные районы Баренцева моря имеют схожие профили. Для последних характерно более «равномерное» содержание конгенеров. На основании представленных профилей можно заключить, что загрязнение ДО основной акватории Баренцева моря происходит, вероятно, за счёт широко используемых в прошлом зарубежных препаратов групп Клофен и Арохлор. В отличие от них отечественные Совол и Советол практически не содержат низко- (3-ХБ) и высокоХлорированных гептаклорбифенилов (7-ХБ) [Горбунова и др., 2011; De Voogt et al., 1990], что как раз более характерно для Кольского залива (рис. 3).

Приведённая на рис. 3 кривая Арохлор-Клофен отражает среднее содержание конгенеров ПХБ в условной смеси препаратов Арохлор 1241, Арохлор 1254, Клофен A50 и Клофен A60, вычисленное нами на основе известных данных [Горбунова и др., 2011]. Поскольку профили конгенеров ПХБ между районами Баренцева моря сопоставимы, то с учётом значительного охвата акватории (районы 2–4 на рис. 2) и длительного периода наблюдений можно предположить, что поток ПХБ в Баренцево море остаётся относительно постоянным. Такого же мнения придерживаются и зарубежные авторы в отношении западной части Баренцева моря [Zaborska et al., 2011].

Упомянутая выше однородность в профилях ПХБ возникает, в том числе, и по причине обработки большого количества данных (станций) как результат усреднения. Проследить специфику загрязнения отдельных участков шельфа и обнаружить её динамику можно только путём более детального анализа данных. С целью выявления влияния удаления от источников загрязнения ПХБ на основе данных о станциях ДО, выполненных восточнее и южнее о. Западный Шпицберген в 2005 и 2006 гг., нами составлен условный «разрез». Схема разреза представлена на рис. 4. Течения на схеме показаны на основе опубликованных данных ПИНРО [Ожигин и др., 2016]. Станции разреза пронумерованы в направлении с севера на юг: 1–4 располагаются в проливе Стур-Фьорд, 5–9 – на западном склоне Шпицбергенской банки, 10 – к юго-востоку от о. Медвежий. Общая протяжённость разреза составила около 550 км.

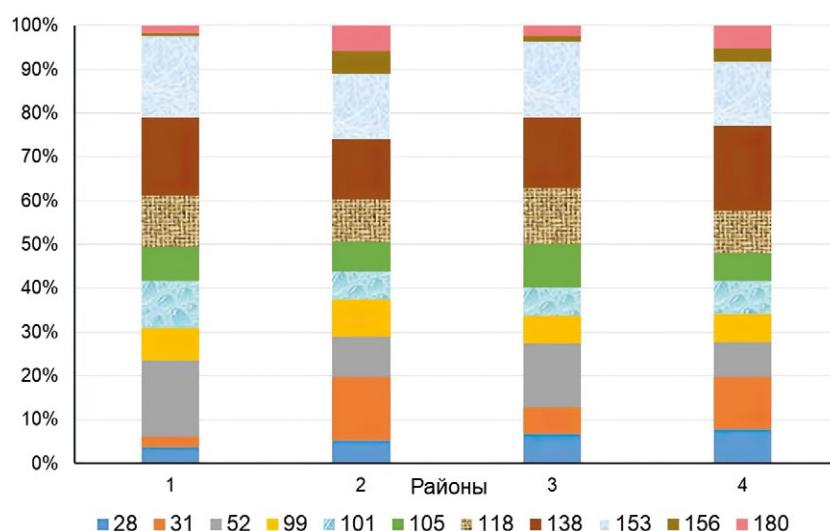


Рис. 2. Профили конгенеров PCB_{11} в ДО отдельных районов Баренцева моря: 1 – район Кольского залива; 2 – шельф Шпицбергена; 3 – Центральная впадина; 4 – Северо-Восточный район

Fig. 2. Profiles of PCB_{11} congeners in bottom sediments in particular areas of the Barents Sea: 1 – the Kola Bay; 2 – Spitsbergen shelf; 3 – the Eastern (Central) Basin; 4 – the northeastern Barents Sea

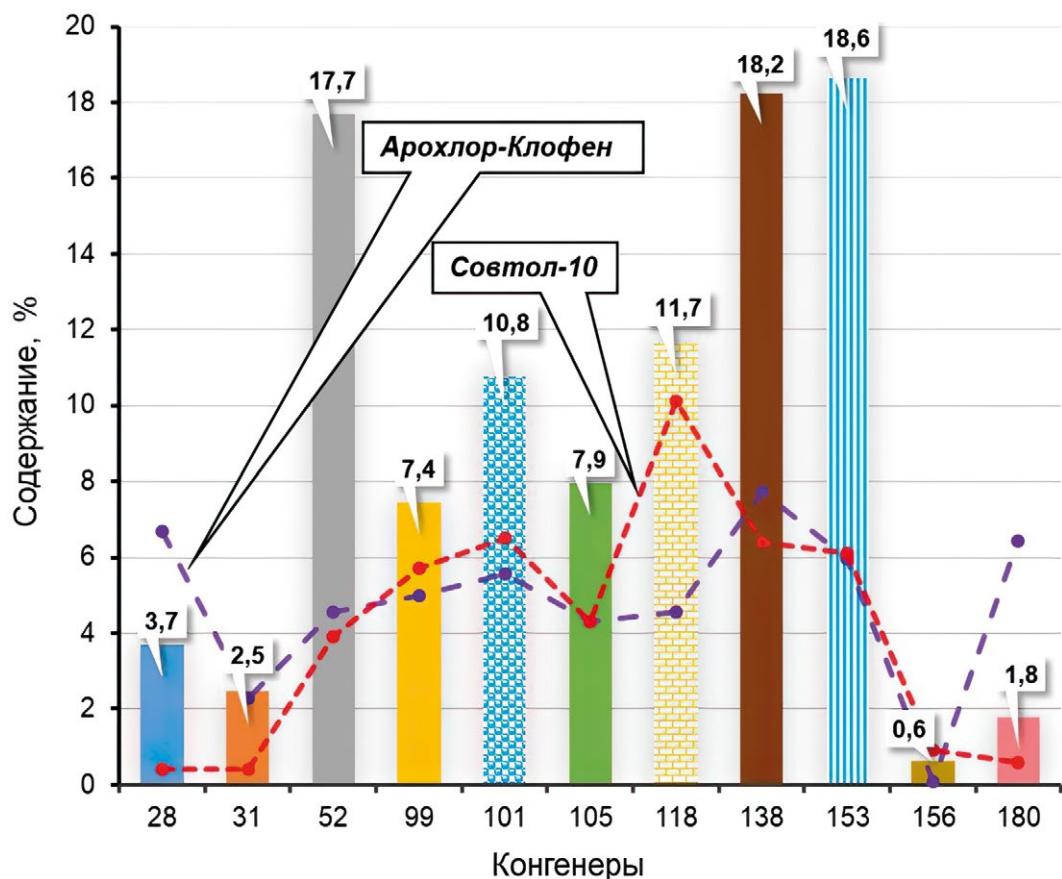


Рис. 3. Профиль конгенеров ПХБ₁₁ в ДО Кольского залива, в препарате Совтол-10 (красные штрихи) и смеси Арохлор-Клофен (синие штрихи), %

Fig. 3. Profile of PCB11 congeners in bottom sediments from the Kola Bay, using «Sovtol-10» (red dashes) and «Arochlors-Clophens» solutions (violet dashes), %

Предваряя представление данных по отобранным станциям, следует отметить, что бассейн рек и ручьев восточного побережья о. Западный Шпицберген практически не подвержен непосредственному антропогенному воздействию. Эта часть Шпицбергена почти не освоена человеком. Терригенный сток здесь формируется практически исключительно за счёт атмосферных осадков, таяния фирна и льда. Водосборные площади водотоков представляют собой узкие полосы вдоль берега. Таким образом, в прибрежные воды и пролив Стур-Фьорд попадает в основном старое загрязнение ПХБ, сформировавшееся за счёт дальнего атмосферного переноса и зарезервированное в ледниках. Аналогичное утверждение можно сделать и для лежащего с другой стороны пролива западного берега о. Эдж. Наше предположение в отношении характера загрязнения поддерживается другими исследователями [Zaborska et al., 2011].

Из рис. 5 видно, что распределение суммы и характер профилей ПХБ по станциям разреза неоднородные. Это вполне естественно, т. к. разрез пересекает участки шельфа, характеризующиеся различной

глубиной, составом донных отложений, бентоса и др. Тем не менее, по мере отдаления от берегов архипелага отмечается тренд на общее снижение ΣПХБ в ДО (ст. 3–10 на рис. 5А), что, вероятно, следует увязывать с удалением от источника загрязнения. Наилучшим образом указанный тренд просматривается в ДО южного участка рассматриваемого разреза, на западном склоне Шпицбергенской банки (ст. 7–10).

Несмотря на то, что ст. 7–10 расположены на различных глубинах, варьирующих от 113 до 301 м, тренд профиля ПХБ заключается в заметном увеличении доли конгенеров 99, 101 и 138 и уменьшением доли 153. В тренде полностью исчезают конгенеры, сначала 187, затем 156 и 180. Указанные станции, как впрочем и ст. 5, 6, находятся под влиянием Медвежинского течения, несущего холодные воды и морской лёд с севера, из северных проливов [Ожигин и др., 2016; Марченко, 2018]. Влияние этого течения не всегда однозначно. Однако, оно способно приносить свежее загрязнение, например, 3-ХБ и 4-ХБ на ст. 10, которое затем, вероятно, убывает в направлении ст. 8 (см. рис. 5В).

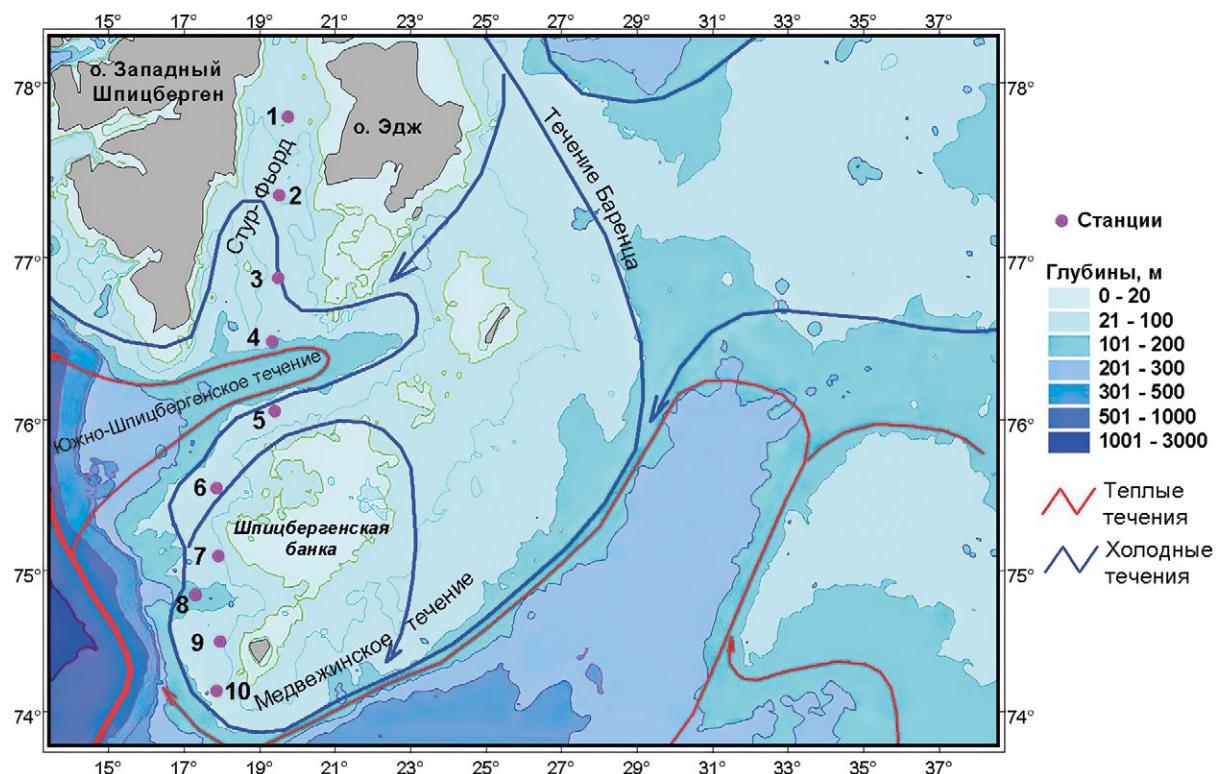
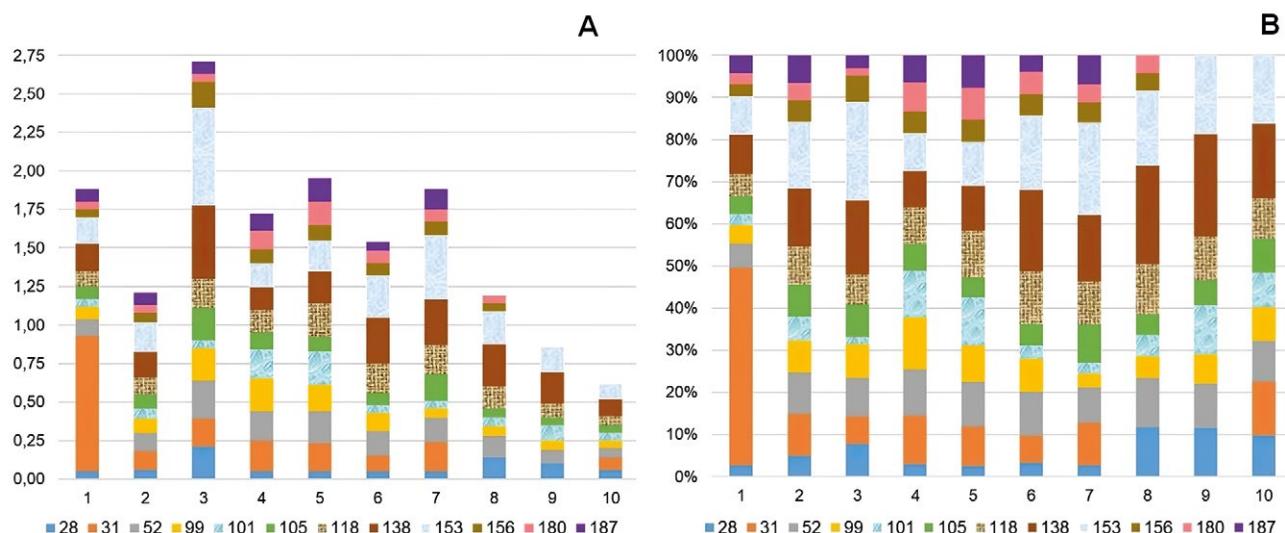


Рис. 4. Расположение станций условного разреза на шельфе Шпицбергена

Fig. 4. Location of the stations in the conditional section in the Spitsbergen shelf

Рис. 5. Изменение профилей конгенеров ПХБ₁₂ в ДО станций условного разреза на шельфе Шпицбергена в абсолютных величинах, нг/г сухой массы (А) и в процентах (Б)Fig. 5. Variations in the profiles of PCB₁₂ congeners in bottom sediments taken in the stations of the conditional section in the Spitsbergen shelf in absolute values, ng/g of dry weight (A) and in percentage (B)

На мелководной ст. 1 (глубина 51 м) отмечено очень высокое содержание конгенера 31, почти 47%, что вероятно связано с активным поступлением ПХБ в результате таяния многолетнего льда или поступления свежего загрязнения с осадками (см. рис. 4). Ана-

логичное предположение было выдвинуто МакГоверном с соавт. [McGovern et al., 2022] в отношении содержания низкохлорированных ПХБ в воде и взвеси, поступающей с питающего бассейна в Конгс-фьорд (о. Западный Шпицберген). На расположенных южнее

более глубоководных ст. 2 (144 м) и 3 (151 м) процентное содержание ПХБ-31 резко снижается и становится мало отличимым от многих других станций разреза. При этом общее содержание ПХБ претерпевает значительные изменения (см. рис. 4), а ст. 3 может рассматриваться как локальная геологическая ловушка с высоким содержанием Σ ПХБ и наибольшим содержанием конгенеров 138 и 153.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализируя полученные данные, следует иметь ввиду, что каждый конгенер ПХБ из состава промышленной смеси, тем или иным путём оказавшейся в окружающей среде, проходит свой путь в ходе дальней миграции (переноса) в атмосфере или водной среде. В атмосфере процессы миграции разнятся за счёт проявления известного механизма холодной конденсации с повторным испарением [Wania, 2003], в водной среде – за счёт индивидуальной растворимости, которая в пресных водах выше, чем в морских [Янин, 1997; McGovern et al., 2022]. Кроме того, загрязнение ПХБ может перемещаться с дрейфующим морским льдом. По оценкам, подготовленным Арктической программой мониторинга и оценки (AMAP), примерно 45% ПХБ, достигающих Шпицбергена, переносятся воздушным путём, 30% – океанскими течениями и 25% – морским льдом [AMAP, 2004]. Известно, что многолетние морские льды регулярно достигают Шпицбергенской банки и о. Медвежий, где интенсивно тают на границе контакта холодного Медвежинского и тёплого Шпицбергенского течений [Марченко, 2018]. При этом освобождающееся связанное со льдом загрязнение активно поступает в воду и на поверхность дна вместе с осаждающейся взвесью, обуславливая повышенное загрязнение ДО ПХБ на ст. 5 и 7.

Разнос загрязнения по акватории расположенного в высоких широтах Баренцева моря также может быть обусловлен аблацией ледников на арктических архипелагах, включающий, в том числе, испарение с их поверхности (вторичное загрязнение атмосферы). Стабильное присутствие высокохлорированных гекса- (6-ХБ) и гепта- (7-ХБ) ПХБ в ДО свидетельствует об их устойчивом переносе в высокие широты и очень низкой скорости деградации [Breivik et al., 2002; AMAP, 2004; 2016]. В ряде исследований показано, что загрязнение ПХБ продолжает поступать в атмосферу с высокогорий Европы (Альпы) и Азии. Так, на поверхность высокогорных озёр в Альпах поток ПХБ составляет до 38 нг/м² в неделю [Carrera et al., 2001], а на поверхность озера Байкал – до 3 нг/м² в неделю [Никонова, Горшков, 2007].

Исходя из общих представлений очевидно, что низкомолекулярные, низкохлорированные конгенеры ПХБ могут быстрее переноситься на дальние расстояния, а значит в высоких широтах свидетельствовать об относительно свежем загрязнении [Wania, 2003; McGovern et al., 2022]. По всей видимости, повышенное удельное содержание упомянутых 3-ХБ и 4-ХБ в ДО Баренцева моря (см. рис. 2, столбцы 2–4) по сравнению с таковым в промышленных смесях иностранного производства (не более 22%) [De Voogt et al., 1990], связано именно с их активной миграцией в морской среде и атмосфере.

Отмечено, что обилие конгенера ПХБ-52 (4-ХБ) во всех образцах ДО Конгс-фьорда и впадающих в него рек согласуется с доминированием этого конгенера в снегу [Hermansson et al., 2020] и на поверхности почв о. Западный Шпицберген [Aslam et al., 2019]. Кроме того, концентрация ПХБ-52 в настоящее время не снижается в пробах воздуха, собранных в обсерватории Цеппелин (Zeppelin) на о. Западный Шпицберген, пос. Ню-Олесунн [Hung et al., 2016]. В период таяния снега, когда в реках Шпицбергена наблюдаются наиболее высокие концентрации растворённого органического углерода, может происходить активный перенос недавно осаждённых с осадками ПХБ-52 и других низкохлорированных ПХБ в растворённой и взвешенной фазе в прибрежные районы, где они могут накапливаться в бентали [McGovern et al., 2022].

Как следует из диаграмм, представленных на рис. 2, основные отличия в профилях конгенеров ПХБ из сравниваемых районов имеют место в отношении «крайних» номеров – 28, 31, 156 и 180. 3-ХБ в районе Кольского залива в условиях относительно высокого уровня локального загрязнения составляют всего 4% от всей суммы ПХБ, в время как для шельфа Шпицбергена 3-ХБ составляют 25% от суммы. Появление 3-ХБ на шельфе Шпицбергена, как мы уже отмечали, связано с их наибольшей способностью к дальнему трансграничному переносу. Наши данные хорошо согласуются с данными норвежских исследователей, согласно которым содержание только ПХБ-28 (ПХБ-31 не определяли) во взвешенном веществе рек и фьордов о. Западный Шпицберген составляет в среднем 15–20% от Σ ПХБ. Кроме того, во взвешенном веществе рек и фьордов Западного Шпицбергена отмечено относительно высокое содержание ПХБ-180 порядка 8–10% Σ ПХБ [McGovern et al., 2022], что также согласуется с нашими результатами.

Для подверженных значительному антропогенному воздействию ДО ряда заливов Западного Мурмана, включая Кольский, характерно повышенное содержание пента- (5-ХБ) и гексахлорбифенилов (конгенеры

99, 101, 105, 118, 138, 153, 156), составляющих около 75 % от общего содержания. В ДО шельфа Шпицбергена и Северо-Восточного района последние составляют около 65 %. Содержание 5-ХБ и 6-ХБ на уровне 75 % также указывает на связь загрязнения района Кольского залива с применяемыми до 1995 г. в ССР и России техническими смесями типа Солов и Сартол, т. е. на локальное антропогенное воздействие [Бродский и др., 2012; Плотицына, 2016; Ivanov, Sandell, 1992].

Как видно из рис. 5 содержание высоких хлорированных 6-ХБ и 7-ХБ (начиная с ПХБ-153) по мере удаления от побережья Шпицбергена снижается на ст. 7–10 с 38 до 17 %, очевидно, вследствие своей меньшей подвижности в окружающей среде. Ранее, на примере Рыбинского водохранилища также было отмечено, что по мере удаления от источника загрязнения снижается не только общее содержание ПХБ, но и доля 6-ХБ и 7-ХБ с 26,6 до 10,7 % [Чуйко и др., 2010].

ВЫВОДЫ

В результате проведённого исследования выявлены различия в характере загрязнения ПХБ ДО района шельфа к юго-востоку от Шпицбергена, а также Центральной впадины и северо-восточного района Баренцева моря, обусловленного глобальным загрязнением, от района Кольского залива, где преобладает локальное загрязнение. В последнем случае низкое содержание конгенеров 28, 31 и 180 свидетельствует о загрязнении ДО Кольского залива преимущественно отечественными техническими смесями типа Солов и Сартол.

Повышенное содержание низкохлорированных (3-ХБ, 4-ХБ) и высоких хлорированных (7-ХБ) отмечается в ДО прибрежной части арх. Шпицберген и в значительной степени характеризует загрязнение в результате дальнего трансграничного переноса.

На основе анализа путей транспорта ПХБ в высокие широты, количества и состава конгенеров в ДО шельфа сделан вывод, что северо-западная часть Баренцева моря накапливает загрязнение ПХБ, поступающее в результате дальнего атмосферного переноса, таяния морского льда и ледникового покрова арх. Шпицберген. Аналогичные явления, очевидно, наблюдаются и в районе Земли Франца-Иосифа.

При анализе профилей конгенеров ПХБ в ДО станций условного разреза на шельфе Шпицбергена отмечено убывание уровня загрязнения по мере удаления от берега (с севера на юг). При этом наиболее заметным образом варьирует относительное содержание конгенеров 99, 101, 138 (увеличивается) и 153

(снижается); полностью исчезают конгенеры 156, 180 и 187.

Уровни загрязнения ПХБ ДО Баренцева моря, рассмотренные в настоящем исследовании, значительно ниже уровней, которые могли бы представлять опасность для морских организмов или здоровья человека.

Благодарности

Авторы выражают благодарность старшему инженеру лаборатории химико-аналитических исследований, ранее – рыбохозяйственной экологии, Т.А. Зимошейской за неоценимую помощь по химическому анализу проб донных отложений.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания «ПИНРО» им. Н.М. Книповича» по теме «Оценка состояния, распределения, численности и воспроизводства водных биологических ресурсов, а также среди их обитания».

ЛИТЕРАТУРА

- Батоев В.Б., Цыденова О.В., Нимацыренова Г.Г., Палицына С.С. 2004. Стойкие органические загрязнители в бассейне озера Байкал. ГПНТБ, Байкальский ин-т природопользования СО РАН. Новосибирск. 110 с.
- Бродский Е.С., Евдокимова Г.В., Злотин С.Г., Клюев Н.А., Самсонов Д.П., Шинкова Н.А., Юфит С.С. 2004. Утилизация электротехнических жидкостей, содержащих полихлорированные бифенилы (ПХБ) // Зелёная химия в России. М.: Изд-во Моск. ун-та. С. 163–186.
- Бродский Е.С., Шелепчиков А.А., Фешин Д.Б., Ефименко Е.С., Агапкина Г.И. 2012. Профиль конгенеров полихлорированных бифенилов в почвах Москвы // Вестник Московского ун-та. Сер. 17. Почвоведение. № 2. С. 35–40.
- Горбунова Т.И., Первова М.Г., Забелина О.Н., Салоутин В.И., Чупахин О.Н. 2011. Полихлорбифенилы: Проблемы экологии, анализа и химической утилизации. М.: КРАСАНД; Екатеринбург: УрО РАН. 400 с.
- Запевалов М.А. 2018. Мониторинг стойких органических загрязнителей – объективный и независимый инструмент оценки эффективности Стокгольмской конвенции о СОЗ (2001) // Химическая безопасность. Т. 2. № 2. С. 295–307. doi:10.25514/CHS.2018.2.14123.
- Марченко Н.А. 2018. Изучение особенностей дрейфа льда в Баренцевом море // Вестн. газовой науки: научно-технический сборник. № 4 (36). С. 166–179.
- Никонова А.А., Горшков А.Г. 2007. Современные уровни накопления полихлорированных бифенилов в объектах Байкальской природной территории // Химия в интересах устойчивого развития. Т. 15. № 3. С. 363–369.

- Новиков М.А. 2021. Стойкие органические загрязнители в донных отложениях Баренцева моря // Водные ресурсы. Т. 48. № 3. С. 334–343. doi:10.31857/S032105962103010X.
- Ожигин В.К., Ившин В.А., Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Анциферов М.Ю. 2016. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: ПИИРО. 260 с.
- Плотицына Н.Ф. 2009. Персистентные хлорированные углеводороды в воде и донных осадках Кольского залива // Кольский залив: освоение и рациональное природопользование. М.: Наука. С. 303–313.
- Плотицына Н.Ф. 2016. Персистентные хлорированные углеводороды в донных отложениях Баренцева моря на стандартном разрезе «Кольский меридиан» // Труды Кольского НЦ РАН. № 2. С. 271–281.
- Чуйко Г.М., Законов В.В., Морозов А.А., Бродский Е.С., Шелепчиков А.А., Фешин Д.Б. 2010. Пространственное распределение и качественный состав полихлорированных бифенилов (ПХБ) и хлорорганических пестицидов (ХОП) в донных отложениях и леще (*Abramis brama* L.) Рыбинского водохранилища // Биология внутренних вод. № 2. С. 98–108.
- Янин Е.П. 1997. Полихлорированные бифенилы в окружающей среде (экологогигиенические аспекты). М.: Изд-во «Диалог МГУ». 35 с.
- AMAP Assessment 2002: The Influence of Global Change on Contaminant Pathways to, within, and from the Arctic. 2003. Arctic Monitoring and Assessments Programme (AMAP). Oslo, Norway. 65 p.
- AMAP Assessment 2002: Persistent organic pollutants in the Arctic. 2004. Arctic Monitoring and Assessments Programme (AMAP). Oslo, Norway, 2004. 310 p.
- AMAP Assessment 2016: Chemicals of Emerging Arctic Concern. 2017. Arctic Monitoring and Assessments Programme (AMAP). Oslo, Norway. 353 p.
- Aslam S. N., Huber C., Asimakopoulos A. G., Steinnes E., Mikkelsen O. 2019. Trace elements and polychlorinated biphenyls (PCBs) in terrestrial compartments of Svalbard, Norwegian Arctic // Sci. Total Environ. V. 685. P. 1127–1138. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.060.
- Bakke T., Breedveld G., Kolvgist T., Oen A., Eek E., Ruus A., Kibsgaard A., Helland A., Hylland K. 2007. Veileder for klassifisering av miljøkvalitet i fjorder og kystfarvann – Revision av klassifisering av metaller og organiske miljøgifter i vann og sedimenter // Norsk institutt for vannforskning. Oslo: SFT, 12 p. (Veileddning; TA-2229/2007).
- Borlakoglu J. T., Heagele K. D. 1991. Comparative aspects on the bioaccumulation, metabolism and toxicity with PCBs // Comp. Biochem. Physiol. V. 100C. № 3. P. 327–338. doi:10.1016/0742-8413(91)90004-d.
- Breivik K., Sweetman A., Pacyna J. M., Jones K. C. 2002. Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners – a mass balance approach: 2. Emissions // Sci. Total Environ. V. 290 (1–3). P. 199–224. doi:10.1016/S0048-9697(01)01076-2.
- Carrera G., Fernández P., Vilanova R. M., Grimalt J. O. 2001. Persistent organic pollutants in snow from European high mountain areas // Atmos. Environ. V. 35 (2). P. 245–254. doi:10.1016/S13-522310(00)00201-6.
- Carroll J., Zaborska A., Papucci C., Schirone A., Carroll M., Pempkowiak J. 2008. Accumulation of organic carbon in the western Barents Sea // Deep-Sea Res. Pt. II. V. 55 (20–21). P. 2361–2371. doi:10.1016/j.dsrr.2008.05.005.
- De Voogt P., Wells D., Reutergardh L., Brinkman U.A.T. 1990. Biological activity, determination and occurrence of planar, mono- and di-ortho PCBs // Intern. J. Environ. Anal. Chem. V. 40 (1–4). P. 1–46. doi:10.1080/03067319008030516.
- Hermanson M.H., Isaksson E., Divine D., Teixeira C., Muir D.C.G. 2020. Atmospheric deposition of polychlorinated biphenyls to seasonal surface snow at four glacier sites on Svalbard, 2013–2014 // Chemosphere. V. 243. P. 1–8. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.125324.
- Hung H., Katsoyiannis A. A., Brorstrom-Lunden E., Olafsdottir K., Aas W., Breivik K., Bohin-Nizzetto P., Sigurdsson A., Hakola H., Bossi R., Skov H., Sverko E., Barresi E., Felin P., Wilson S. 2016. Temporal trends of persistent organic pollutants (POPs) in arctic air: 20 years of monitoring under the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) // Environ. Pollut. V. 217. P. 52–61. doi:10.1016/j.envpol.2016.01.079.
- Ivanov V., Sandell E. 1992. Characterization of polychlorinated biphenyl isomers in Sovol and Trichlorodiphenyl formulations by high-resolution gas chromatography with electron capture detection and high-resolution gas chromatography-mass spectrometry techniques // Environ. Sci. Technol. Vol. 26. P. 2012–2017.
- McGovern M., Master M., Borga K., Heimstad E., Ruus A., Christensen G., Evensen A. 2022. Small Arctic rivers transport legacy contaminants from thawing catchments to coastal areas in Kongsfjorden, Svalbard // Environmental Pollution. V. 304. P. 1–7. doi:10.1016/j.envpol.2022.119191.
- Rodrigues J. L. M., Kachel C. A., Aiello M. R., Quensen J. F., Maltseva O. V., Tsoi T. V., Tiedje J. M. 2006. Degradation of Aroclor 1242 dechlorination products in sediments by *Burkholderia xenovorans* LB400 (ohb) and *Rhodococcus* sp. strain RHA1 (fcb) // Appl. Environ. Microbiol. V. 72 (4). P. 2476–2482. doi:10.1128/AEM.72.4.2476–2482.2006.
- Shatalov V., Gusev A., Dutchak S., Rozovskaya O., Sokovykh V., Vulykh N., Aas W., Breivik K. 2010. Persistent Organic Pollutants in the Environment. EMEP Status Rep. 3/2010. 101 p.
- Wania F. 2003. Assessing the potential of persistent organic chemicals for long-range transport and accumulation in polar region // Environ. Sci. Technol. V. 37. P. 1344–1351. doi:10.1021/es026019e.
- Zaborska A., Carroll J., Papucci C., Toricelli L., Carroll M., Walkusz-Miotk J., Pempkowiak J. 2008. Recent sediment accumulation rates for the western margin of the Barents Sea // Deep-Sea Res. Pt. II. V. 55 (20–21). P. 2352–2360. doi:10.1016/j.dsrr.2008.05.026.
- Zaborska A., Carroll J., Ksenia P., Pempkowiak J. 2011. Spatio-temporal patterns of PAHs, PCBs and HCB in sediments of the western Barents Sea // Oceanologia. V. 53 (4). P. 1005–1026. doi:10.5697/oc.53-4.1005.

REFERENCES

- Batoev V.B., Tsydenova O.V., Nimatsyrenova G.G., Palitsyna S.S. 2004. Persistent Organic Pollutants in Lake Baikal Basin. GPNTB, Baikal'skii in-t prirodopol'zovaniya SO RAN. Novosibirsk. 110 p. (In Russ.).
- Brodskiy E.S., Evdokimova G.V., Zlotin S.G., Klyuev N.A., Samsonov D.P., Shinkova N.A., Yufit S.S. 2004. Disposal of electrical liquids containing polychlorinated biphenyls (PCBs) // Green chemistry in Russia. M.: Izd-vo Mosk. un-ta. P. 163–18. (In Russ.).
- Brodskiy E.S., Shelechikov A.A., Feshin D.B., Efimenko E.S., Agapkina G.I. 2012. Profile of congeners of polychlorinated biphenyls in soils of Moscow-city // Moscow University Bulletin. Series 17. Soil science. № 2. P. 35–40. (In Russ.).
- Gorbunova T.I., Pervova M.G., Zabelina O.N., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. 2011. Polychlorobiphenyls: Problems of ecology, analysis and chemical disposal. M.: KRASAND; Ekaterinburg: UrO RAN. 400 p. (In Russ.).
- Zapevalov M.A. 2018. Monitoring persistent organic pollutants – an objective and independent tool for evaluating effectiveness of Stockholm convention on POPs (2001) // Chemical Safety Sciences. V. 2. № 2. P. 292–307. doi:10.25514/CHS.2018.2.14123. (In Russ.).
- Marchenko N.A. 2018. Special study of ice drifting in Barents Sea // Gas Science Bulletin. № 4 (36). P. 167–179. (In Russ.).
- Nikonova A.A., Gorshkov A.G. 2007. Modern levels of the accumulation of polychlorinated diphenyls in the objects of the Baykal natural territory // Chemistry for sustainable development. V. 15. № 3. P. 363–359. (In Russ.).
- Novikov M.A. 2021. Persistent organic pollutants in Barents Sea bottom sediments // Water Resources. V. 48. No 3. P. 439–448. doi: 10.1134/S0097807821030106.
- Ozhigin V.K., Ivshin V.A., Trofimov A.G., Karsakov A.L., Antsiferov M.Yu. 2016. The Barents Sea waters: structure, circulation, variability. Murmansk: PINRO. 260 pp. (In Russ.).
- Plotitsyna N.F. 2009. Persistent chlorinated hydrocarbons in the water and bottom sediments of the Kola Bay // Kola Bay: development and rational use of natural resources. M.: Nauka. P. 303–313 (In Russ.).
- Plotitsyna N.F. 2016. Persistent chlorinated hydrocarbons in bottom sediments of the Barents Sea on the standard transect «Kola section» // Trudy Kol'skogo NTs RAN. № 2. P. 271–281. (In Russ.).
- Chuiko G.M., Zakonov V.V., Morozov A.A., Brodskii E.S., Shelechikov A.A., Feshin D.B. 2010. Spatial Distribution and Qualitative Composition of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) and Organochlorine Pesticides (OPs) in Bottom Sediments and Bream (*Abramis brama* L.) from the Rybinsk Reservoir // Biologiya vnutrennih vod. № 2. P. 98–108. (In Russ.).
- Yanin E.P. 1997. Polychlorinated biphenyls in the environment (ecological and hygienic aspects). M.: Dialog MSU Publish. 35 p. (In Russ.).
- AMAP Assessment 2002: The Influence of Global Change on Contaminant Pathways to, within, and from the Arctic. 2003. Arctic Monitoring and Assessments Programme (AMAP). Oslo, Norway. 65 p.
- AMAP Assessment 2002: Persistent organic pollutants in the Arctic. 2004. Arctic Monitoring and Assessments Programme (AMAP). Oslo, Norway, 2004. 310 p.
- AMAP Assessment 2016: Chemicals of Emerging Arctic Concern. 2017. Arctic Monitoring and Assessments Programme (AMAP). Oslo, Norway. 353 p.
- Aslam S.N., Huber C., Asimakopoulos A.G., Steinnes E., Mikkelsen O. 2019. Trace elements and polychlorinated biphenyls (PCBs) in terrestrial compartments of Svalbard, Norwegian Arctic // Sci. Total Environ. V. 685. P. 1127–1138. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.06.060.
- Bakke T., Breedveld G., Kolgvist T., Oen A., Eek E., Ruus A., Kibsgaard A., Helland A., Hylland K. 2007. Veileder for klassifisering av miljøkvalitet i fjorder og kystfjordvann – Revision av klassifisering av metaller og organiske miljøgifter i vann og sedimenter // Norsk institutt for vannforskning. Oslo: SFT, 12 p. (Veileddning; TA-2229/2007).
- Borlakoglu J.T., Heagele K.D. 1991. Comparative aspects on the bioaccumulation, metabolism and toxicity with PCBs // Comp. Biochem. Physiol. V. 100C. № 3. P. 327–338. doi:10.1016/0742-8413(91)90004-d.
- Breivik K., Sweetman A., Pacyna J.M., Jones K.C. 2002. Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners – a mass balance approach: 2. Emissions // Sci. Total Environ. V. 290 (1–3). P. 199–224. doi:10.1016/S0048-9697(01)01076-2.
- Carrera G., Fernández P., Vilanova R.M., Grimalt J.O. 2001. Persistent organic pollutants in snow from European high mountain areas // Atmos. Environ. V. 35 (2). P. 245–254. doi:10.1016/S13-522310(00)00201-6.
- Carroll J., Zaborska A., Papucci C., Schirone A., Carroll M., Pempkowiak J. 2008. Accumulation of organic carbon in the western Barents Sea // Deep-Sea Res. Pt. II. V. 55 (20–21). P. 2361–2371. doi:10.1016/j.dsro.2008.05.005.
- De Voogt P., Wells D., Reutergardh L., Brinkman U.A.T. 1990. Biological activity, determination and occurrence of planar, mono- and di-ortho PCBs // Intern. J. Environ. Anal. Chem. V. 40 (1–4). P. 1–46. doi:10.1080/03067319008030516.
- Hermanson M.H., Isaksson E., Divine D., Teixeira C., Muir D.C.G. 2020. Atmospheric deposition of polychlorinated biphenyls to seasonal surface snow at four glacier sites on Svalbard, 2013–2014 // Chemosphere. V. 243. P. 1–8. doi:10.1016/j.chemosphere.2019.125324.
- Hung H., Katsoyannis A.A., Brorstrom-Lunden E., Olafsdottir K., Aas W., Breivik K., Bohin-Nizzetto P., Sigurdsson A., Hakola H., Bossi R., Skov H., Sverko E., Barresi E., Felin P., Wilson S. 2016. Temporal trends of persistent organic pollutants (POPs) in arctic air: 20 years of monitoring under the Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) // Environ. Pollut. V. 217. P. 52–61. doi:10.1016/j.envpol.2016.01.079.
- Ivanov V., Sandell E. 1992. Characterization of polychlorinated biphenyl isomers in Sovol and Trichlorodiphenyl formulations by high-resolution gas chromatography with electron capture detection and high-resolution gas chromatography-mass spectrometry techniques // Environ. Sci. Technol. Vol. 26. P. 2012–2017.
- McGovern M., Master M., Borga K., Heimstad E., Ruus A., Christensen G., Evensen A. 2022. Small Arctic rivers transport legacy contaminants from thawing catchments to coastal

- areas in Kongsfjorden, Svalbard // Environmental Pollution. V. 304. P. 1–7. doi:10.1016/j.envpol.2022.119191.
- Rodrigues J. L. M., Kachel C. A., Aiello M. R., Quensen J. F., Maltseva O. V., Tsoi T. V., Tiedje J. M. 2006. Degradation of Aroclor 1242 dechlorination products in sediments by *Burkholderia xenovorans* LB400 (ohb) and *Rhodococcus* sp. strain RHA1 (fcb) // Appl. Environ. Microbiol. V. 72 (4). P. 2476–2482. doi:10.1128/AEM.72.4.2476–2482.2006.
- Shatalov V., Gusev A., Dutchak S., Rozovskaya O., Sokovykh V., Vulykh N., Aas W., Breivik K. 2010. Persistent Organic Pollutants in the Environment. EMEP Status Rep. 3/2010. 101 p.
- Wania F. 2003. Assessing the potential of persistent organic chemicals for long-range transport and accumulation in polar region // Environ. Sci. Technol. V. 37. P. 1344–1351. doi:10.1021/es026019e.
- Zaborska A., Carroll J., Papucci C., Toricelli L., Carroll M., Walkusz-Miotk J., Pempkowiak J. 2008. Recent sediment accumulation rates for the western margin of the Barents Sea // Deep-Sea Res. Pt. II. V. 55 (20–21). P. 2352–2360. doi:10.1016/j.dsr2.2008.05.026.
- Zaborska A., Carroll J., Ksenia P., Pempkowiak J. 2011. Spatio-temporal patterns of PAHs, PCBs and HCB in sediments of the western Barents Sea // Oceanologia. V. 53 (4). P. 1005–1026. doi:10.5697/oc.53–4.1005.

Поступила в редакцию 20.06.2022 г.

Принята после рецензии 12.08.2022 г.