



УДК 551.468:550.42(268.45)

Среда обитания водных биологических ресурсов

Содержание ртути и органического вещества в донных отложениях Баренцева и Карского морей

М.А. Новиков¹, Ж.В. Васильева², А.А. Яшкина², Е.А. Кирдишова², Е.А. Исакова³

¹ Полярный филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича), ул. Академика Книповича, 6, г. Мурманск, 183038

² Мурманский арктический университет (ФГАОУ ВО «МАУ»), ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, 183010

³ Лаборатория медицинских и биологических технологий ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты, Мурманская обл., 184209

E-mail: mnovik@pinro.vniro.ru

SPIN-коды: Новиков М.А. – 2063-5426; Васильева Ж.В. – 8234-9552

Цель работы: получение новых данных о содержании общей ртути (Hg) и органического вещества (ОВ) в донных осадках (ДО) Баренцева и Карского морей, а также оценка связи этих параметров.

Материалом исследования послужили образцы ДО, отобранные в ходе экспедиции НИС «Академик Николай Страхов» (ИО РАН) летом 2019 г. в Баренцевом и Карском морях при выполнении задач изучения состава ДО и оценки антропогенного воздействия на экосистемы.

Новизна: в работе приведены новые материалы по исследованию содержания общей Hg и органического вещества в ДО в юго-восточной части Баренцева и юго-западной части Карского морей.

Используемые методы: массовую долю общей Hg в пробах грунтов ДО определяли методом беспламенной атомной абсорбции на анализаторе ртути РА-915М (Россия). Определение относительного содержания ОВ в пробах ДО выполняли методом прокаливания до постоянной массы (по ГОСТ 23740-2016). Статистическую обработку данных и построение диаграмм осуществляли в среде MS Excel 2016 и Statistica 13.

Результаты: представлены результаты исследования содержания общей Hg и ОВ в ДО Баренцева и Карского морей. В ДО Баренцева моря содержание Hg изменялось от 13,95 до 50,15 мкг/кг при среднем значении 29,5 мкг/кг сухой массы осадка, а в ДО Карского моря – от 17,25 до 52,79 мкг/кг со средним значением 37,5 мкг/кг. Содержание ОВ в ДО обоих морей оказалось примерно одинаковым и составило 2,4-2,6%. Для Баренцева моря установлена значимая корреляция между содержанием общей Hg и ОВ. Повышенное содержание общей Hg в ДО Карского моря, вероятно, отражает вклад региональной составляющей.

Практическая значимость: полученные результаты позволят лучше понимать процессы, связанные с глобальным загрязнением ртутью морских экосистем.

Ключевые слова: Баренцево море, Карское море, донные отложения, ртуть, органическое вещество.

Mercury and organic matter content in bottom sediments of the Barents and Kara Seas

Mikhail A. Novikov¹, Zhanna V. Vasileva², Anna A. Yashkina², Elena A. Kirdishova², Ekaterina A. Isakova³

¹ Polar branch of VNIRO (N.M. Knipovich «PINRO»), 6, Academician Knipovich St., Murmansk, 183038, Russia

² Murmansk Arctic University («MAU»), 13, Sportivnaya St., Murmansk, 183010 Russia

³ Laboratory of Medical and Biological Technologies KSC RAS, Apatity, Murmansk region, 184029 Russia

This study aims to obtain new data on the content of total mercury (Hg) and organic matter (OM) in bottom sediments (BS) of the Barents and Kara Seas, as well as an assessment of the relationship of these parameters.

The material for this study: The research material was samples of BS selected during the expedition of the scientific research vessel Akademik Nikolay Strakhov from June 25 to July 28, 2019 in the Barents and Kara Seas when performing the tasks of studying BS and assessing the anthropogenic impact on ecosystems.

Novelty: The paper presents new original materials on the study of the content of total Hg and OM in BS of the Barents and Kara Seas, as well as an assessment of the relationship of these parameters for marine soils of these Arctic waters.

Methods used: the total mercury content in the samples was estimated by the method of flame-free atomic absorption on the mercury analyzer RA-915M (Russia). The determination of the relative content of organic matter was performed in accordance with Russian standard (GOST 23740-2016) by the gravimetric calcination method to a constant mass ("Loss on Ignition"). Statistical data processing and charting were carried out in the MS Excel 2016 environment and the Statistica 13.

Results: The results of a study of the content of total Hg and OM in the BS of the Barents and the Kara Seas are presented. In the BS of the Barents Sea, the Hg content varied from 13.95 to 50.15 µg/kg with an average value of 29.5 µg/kg of dry sediment, and in the BS of the Kara Sea – from 17.25 to 52.79 µg/kg with an average value of 37.5 µg/kg. The OM in the BS of both seas turned out to be approximately the same and amounted 2.4-2.6%. For the Barents Sea, a correlation has been established between the content of Hg and OM. The increased total Hg content in the BS of the Kara Sea probably reflects the contribution of the regional component.

Practical relevance: The results obtained will make it possible to better understand the processes associated with global mercury pollution of ecosystems in the Arctic.

Keywords: Barents Sea, Kara Sea, bottom sediments, mercury, organic matter.

ВВЕДЕНИЕ

Активное изучение поведения поллютантов в арктическом регионе началось в 1991 г. с момента образования Программы арктического мониторинга и оценки (АМАР) странами, граничащими с Северным Ледовитым океаном (СЛО). Целью Программы стала эффективная оценка экологических рисков для экосистемы и населения. Особое значение в этом проекте уделено тяжёлым металлам [АМАР, 2005]. Повышенное внимание распространению и распределению загрязняющих веществ в Арктике было вызвано возможностью поступления токсичных соединений в населённые прибрежные районы и их влияния на водные биологические ресурсы и рыболовство [Rodrigues et al., 2019; Siegel et al., 2001; Bank et al., 2021]. Одним из приоритетных загрязнителей окружающей среды, обладающих высокой токсичностью, признана ртуть (Hg) [АМАР, 2011; Fedorov et al., 2019]. В августе 2017 г. вступила в силу Минаматская конвенция ООН по ртути¹ – международное соглашение о сокращении выбросов ртути в целях защиты окружающей среды и здоровья человека.

Проблема аккумуляции Hg в экосистеме Арктики стоит наиболее остро, поскольку в её глобальной миграции особую роль играет дальний атмосферный перенос, приводящий к тому, что Hg накапливается в высоких широтах [Golubeva et al., 2003; AMAP, 2005; Sommar et al., 2010; AMAP, 2011; Beldowski et al., 2015]. Атмосферный перенос Hg часто связан с аэрозолями, поступающими в результате извержения исландских вулканов [Захарченко и др., 2020; Beldowski et al., 2015]. Ртуть выбрасывается в атмосферу в основном в газообразном элементарном виде. Атмосферное осаждение ртути в бассейне Баренцева моря оценивается в 4 т/год [Голубева и др., 2005], а в районе Карского моря – 2,6 т/год [Coquery et al., 1995].

Другими источниками поступления ртути в арктические моря являются терригенный сток, океанический транспорт из Западной Европы с водами Континентального склонового и Норвежского течений, таяние ледников на архипелагах и перенос дрейфующими льдами [Ожигин и др., 2016; Новиков, 2021; 2022; Pavlov, Pfirman, 1995; Hansen et al., 1998].

Ртуть представляет собой аккумулируемое нейротоксичное вещество, способное передаваться по пищевым цепям и оказывать значительное воздействие на человека в результате употребления в пищу море-

продуктов и морских млекопитающих [Ji et al., 2019; Bank et al., 2021].

Содержание Hg в ДО относительно незагрязнённых водоёмах Арктического бассейна обычно не превышает 0,03-0,06 мг/кг сухой массы [Fedorov et al., 2018; Aksentov et al., 2021]. О среднем содержании общей Hg в ДО арктических морей РФ также известно, что в Баренцевом море оно составляет 0,058 мг/кг [Новиков, 2017], а в Карском – 0,02 мг/кг [Loring et al., 1998].

В ДО ртуть попадает в составе твёрдых неорганических и органических частиц, поступивших из природных и антропогенных источников в виде оседающей взвеси или в растворённом виде. В водной среде растворённая Hg легко адсорбируется взвесью, сестомом и осаждается на дно. ОВ может связывать до 95% соединений Hg²⁺ [Boszke et al., 2003; Beldowski et al., 2015].

Известно, что основными источниками ОВ в Баренцевом и Карском морях является продукция фитопланктона, ледовых водорослей и фитобентоса. На поверхности дна и в верхнем слое ДО минерализуется около 93% фотосинтезированного в море органического углерода (C_{org}), оседающего на дно [Boszke et al., 2003; Ветров, Романкевич, 2011]. В то время как в наилот и верхний слой ДО сверху из водной толщи поступает взвешенное ОВ преимущественно биогенного происхождения, обеспечивающее деятельность гетеротрофов, снизу из осадков просачиваются восстановленные соединения, необходимые для деятельности автотрофных микроорганизмов [Леин и др., 2013]. К ним добавляется влияние геологических и техногенных источников. Таким образом, связь содержания общей Hg с ОВ может свидетельствовать в пользу отдельных источников её поступления, природных и техногенных.

Целью данного исследования было получение новых данных о содержании общей ртути и органического вещества в ДО Баренцева и Карского морей, а также оценка связи этих параметров.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для исследований послужили образцы ДО, отобранные в ходе экспедиции НИС «Академик Николай Страхов» (ИО РАН) в июне-июле 2019 г. на акватории Баренцева и Карского морей при выполнении задач изучения ДО, а также для оценки природных рисков изменений морского дна, включая бентос, и антропогенной нагрузки на экосистемы Баренцева и Карского морей.

Отбор проб ДО осуществляли с помощью дночерпателя Ван Вина. Взятие проб для последующего

¹ UNEP 2013. Minamata Convention on Mercury. United Nations Environment Programme. 2013. Nairobi, Kenya. 67 p. URL: The Minamata Convention on Mercury | UNEP – UN Environment Programme

анализа выполняли путём отбора верхнего (0-2 см) слоя осадков. Далее пробы упаковывали в маркированные пластиковые зип-пакеты. На борту судна образцы подвергали глубокой заморозке и хранили в термоконтейнерах при температуре минус 20 °С. По окончании экспедиции замороженные пробы ДО были доставлены в стационарную лабораторию для выполнения химических анализов. Для удобства анализа результатов исследований нумерация станций приведена в отсортированном виде в направлении увеличения долготы при выполнении съёмки с запада на восток (рис. 1). Таким образом, в Баренцевом море располагались станции №№ 1-19, а Карском море – №№ 20-40. Отобранные ДО преимущественно были представлены алевритом, алеврито-пелитовыми, пелитовыми илами с примесью алеврито-песчаного и песчано-гравийного материала.

которые анализировались на содержание ртути и общего ОБ.

Массовую долю общей Hg в пробах грунтов ДО определяли методом беспламенной атомной абсорбции на анализаторе ртути РА-915М (ООО «Люмэкс-Маркетинг», Россия). Навески пробы ДО помещали в дозатор и взвешивали на электронных весах AB204 (фирмы «Mettler-Toledo AG», Швейцария). Далее каждую взвешенную пробу вводили в атомизатор для перехода ртути в атомарное состояние, после чего атомный пар с помощью побудителя расхода воздуха поступал в атомно-абсорбционный анализатор. Атомизация содержащейся в пробах ртути происходила в двухсекционном пиролизаторе приставки РП-91С. Пробы анализировали в соответствии с методикой ПНД Ф 16.1:2.23-2000.² Массовую долю Hg определяли по величине аналитического сигнала с учётом

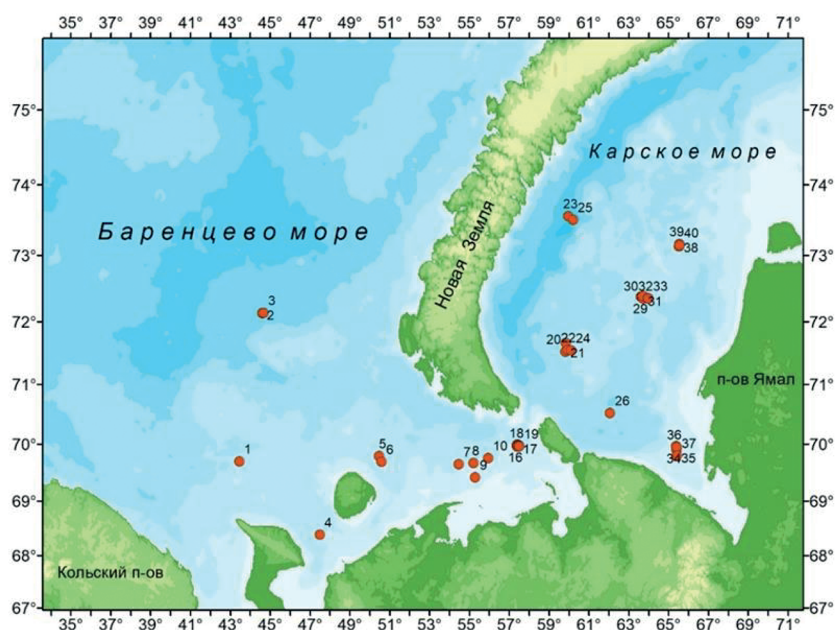


Рис. 1. Карта станций отбора проб донных отложений в Баренцевом и Карском морях
Fig. 1. The map of sediment sampling stations in the Barents and Kara Seas

Анализы проводили в научно-исследовательской лаборатории кафедры «Техносферная безопасность» Мурманского государственного технического университета и испытательной лаборатории ФГБУ «ЦЛАТИ по СЗФО» – «ЦЛАТИ по Мурманской области» (номер записи об аккредитации в реестре аккредитованных лиц Росаккредитации – RA.RU.511453).

Для проведения анализов все пробы были предварительно разморожены и доведены до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре (не выше 20 °С). Пробы тщательно усредняли и перетирали в фарфоровой ступке до однородного состояния. Далее проба делилась на отдельные навески,

предварительно установленного градуировочного коэффициента. Аналитический сигнал обрабатывался с помощью программного обеспечения для РА-915М – программы «RAPID» и заранее установленной градуировочной характеристики. Опыт согласно методике ПНД Ф 16.1:2.23-2000 проводили в двукратной повторности, в случае расхождения данных – в трёхкратной. Для градуировки применяли твёрдые стандартные образцы ГСО 2507-83, ГСО 2508-83, ГСО 2509-83.

² ПНД Ф 16.1:2.23-2000. Методика выполнения измерений массовой доли общей ртути в пробах почв и грунтов на анализаторе ртути «РА-915+» с приставкой «РП-91С». 2005. Санкт-Петербург: Изд-во НПФ «Люмэкс». 16 с.

Для контроля стабильности градуировочной характеристики применяли твёрдые образцы ГСО 2498-83 (стандартный образец состава дерново-подзолистой супесчаной почвы) с близким к образцам низким содержанием ртути. Контроль точности проводился методом добавки в нулевую пробу: стандартный образец раствора ионов ртути ГСО 8004-93 вводился в навеску пробы, избавленную от присутствия ртути после пиролиза и снова подвергался анализу в целях испытания образца со схожей матрицей.

Определение относительного содержания общего ОВ в пробах ДО выполняли согласно ГОСТ 23740-2016³ гравиметрическим методом прокаливания до постоянной массы. Для определения ОВ навески проб для удаления хлоридов отмывали дистиллированной водой, подкисленной серной кислотой до исчезновения реакции на хлор с использованием раствора азотнокислого серебра. Карбонаты в пробах не были обнаружены: отсутствовало выделение газа при обработке проб. Затем навески высушивали в сушильном шкафу при 105 °С до постоянной массы в течение не менее 12 ч. Далее, согласно применяемой методике (ГОСТ 23740-2016), производили просеивание пробы на сите с ячейкой 0,25 мм. Затем навески прокаливали в муфельной печи LOIP-LF-7/11 («ЛОИП», Россия) при температуре 350±10 °С до постоянной массы по схеме анализа А: «для голоценовых аквальных грунтов...» (п. 5.2.4). После охлаждения и взвешивания прокалённых проб оценивали изменение массы зольного остатка. Прокаливание заканчивали тогда, когда разность в массе при двух последовательных взвешиваниях составляла менее 0,005 г. При практическом отсутствии карбонатов потери при прокаливании соответствовали содержанию относительно легко разлагаемого ОВ в исследованных пробах ДО, которое в основном присутствует в их верхнем слое [Леин и др., 2013]. Данный подход соответствует методике определения т. н. LOI (англ. «Loss on Ignition» – потери при прокаливании) [Stevenson et al., 2020]. Обработку проб проводили в трёх повторностях. Относительное содержание ОВ проб, в процентах, вычисляли согласно ГОСТ 23740-2016.

Статистическую обработку данных проводили с использованием программного пакета Statistica 13, а также с помощью прикладного пакета MS Excel 2016.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследований представлены в таблице. Среднее содержание ртути в ДО в юго-восточной

Таблица. Измеренные показатели донных отложений Баренцева (ст. 1-19) и Карского морей (ст. 20-40)

Table. Measured indicators of bottom sediments of the Barents Sea (stations 1-19) and the Kara Sea (stations 20-40)

Станции отбора проб	Содержание ртути, мкг/кг	Органическое вещество, %	Глубина, м
1	17,55	0,72	102
2	30,73	4,77	320
3	50,15	3,37	305
4	46,14	2,67	52
5	13,95	0,72	76
6	18,10	2,27	80
7	23,67	1,39	52
8	41,13	3,21	44
9	14,86	0,74	32
10	19,56	0,73	48
11	30,21	2,65	73
12	33,26	2,81	68
13	24,62	2,90	58
14	25,26	3,71	68
15	43,28	4,51	67
16	34,63	1,78	75
17	26,37	2,76	67
18	32,94	2,25	68
19	34,82	4,81	73
20	38,40	2,14	92
21	47,68	3,26	85
22	51,66	1,92	90
23	46,46	5,76	409
24	43,87	2,13	75
25	48,08	2,30	284
26	52,79	5,09	224
27	17,25	1,35	63
28	29,54	2,96	179
29	44,77	1,07	74
30	25,46	2,12	81
31	37,97	1,43	97
32	30,78	2,51	92
33	32,15	3,24	88
34	51,41	2,20	38
35	37,70	1,23	37
36	21,88	2,05	38
37	34,43	1,36	37
38	27,56	1,89	120
39	29,13	2,11	105
40	37,46	2,14	104

³ ГОСТ 23740-2016. Грунты. Методы определения содержания органических веществ: Москва. Стандартинформ, 2017. Москва: Стандартинформ. 10 с.

части Баренцева моря составило $29,5 \pm 10,6$ (здесь и далее $\pm$ стандартное отклонение) мкг/кг, а в ДО юго-западной части Карского моря – $37,5 \pm 10,3$ мкг/кг (рис. 2). Распределение величин содержания общей Hg в обоих случаях и в объединённой по морям выборке соответствует нормальному по критериям Шапиро-Уилка и Колмогорова-Смирнова.

Согласно Т-критерию Стьюдента ($p=0,022$), содер-

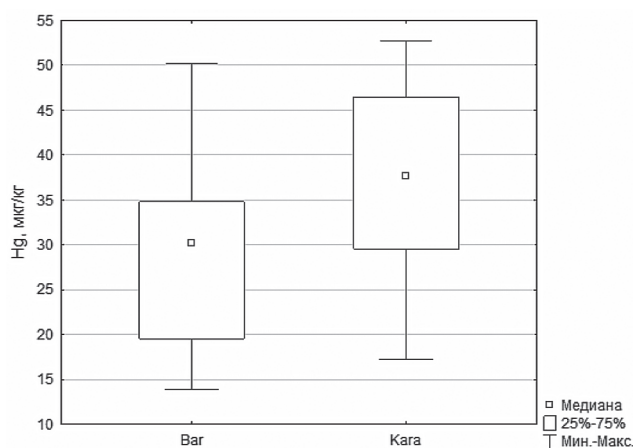


Рис. 2. Сравнение содержание ртути в ДО Баренцева (Bar) и Карского (Kara) морей, мкг/кг

Fig. 2. Comparison of mercury content in bottom sediments of the Barents (Bar) and Kara (Kara) seas, $\mu\text{g}/\text{kg}$

жание Hg в ДО Карского моря достоверно отличается от такового в ДО Баренцева. В то же время, в ходе статистического анализа данных достоверный тренд увеличения содержания общей Hg в исследованных ДО с возрастанием долготы (с запада на восток) не выявлен.

Среднее содержание ОВ в осадках Баренцева моря составило $2,57 \pm 1,33\%$. Содержание ОВ в ДО Карского моря немного отличалось от такового в Баренцевом и было равным $2,39 \pm 1,18\%$ соответственно. Распределение содержания ОВ в ДО Баренцева моря соответствовало нормальному закону по критериям Шапиро-Уилка и Колмогорова-Смирнова. Напротив, содержание ОВ в ДО Карского моря заметно отличалось от нормального по критерию Шапиро-Уилка ($p=0,001$). Отмеченные выше отличия в содержании ОВ в ДО морей были статистически недостоверны по критерию Манна-Уитни ($p=0,432$).

На рис. 3 представлены карты-схемы распределения содержания ОВ в ДО Карского и Баренцева морей. Несмотря на отмеченное отличие от нормального распределения ОВ в Карском море, на карте-схеме практически не удаётся выявить отдельные участки повышенного содержания ОВ. Напротив, для содержания ОВ характерна локальная мозаичность, когда

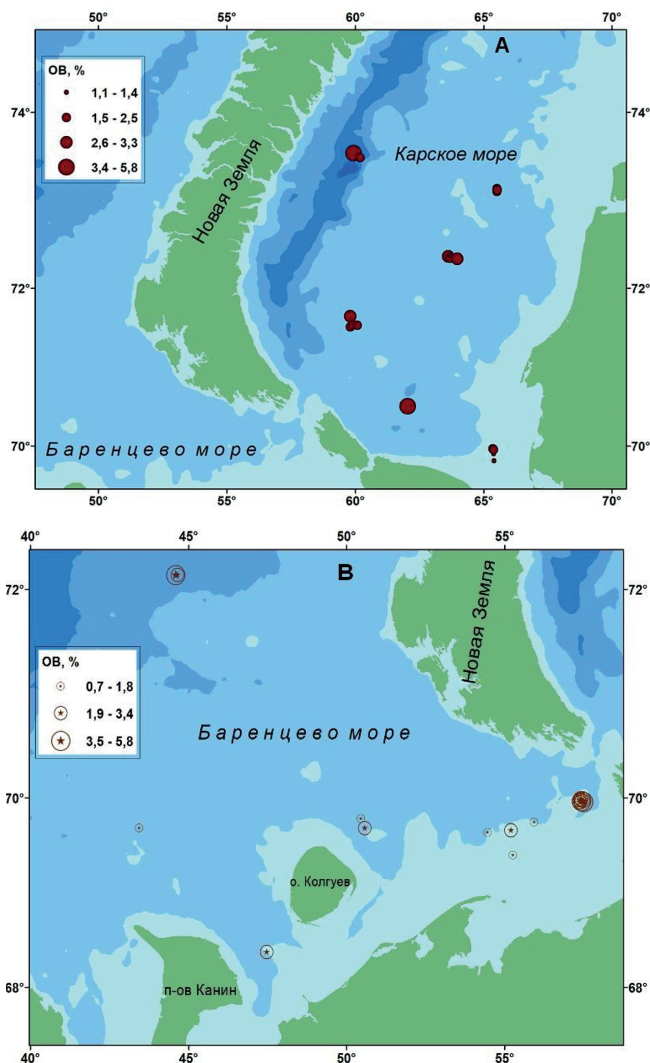


Рис. 3. Содержание ОВ в ДО Карского моря (А) и Баренцева морей (В)

Fig. 3. The content of organic matter (LOI) in the bottom sediments of the Kara (A) and Barents (B) seas

станции с высоким его содержанием сгруппированы со станциями, где содержание ОВ в ДО было относительно низкое.

Анализ связи содержания Hg в ДО Баренцева и Карского морей (объединённая выборка) с уровнем содержания ОВ выявил низкий уровень корреляции с коэффициентами $R_p=0,44$ (по Пирсону) и $R_s=0,41$ (по Спирмену). Однако для ДО отдельно Баренцева моря уровень корреляции был значительно выше, с коэффициентами $R_p=0,64$ и $R_s=0,67$ (при $p<0,05$). Для ДО Карского моря указанные коэффициенты корреляции были соответственно заметно ниже ($R_p=0,36$; $R_s=0,34$ при $p>0,05$), чем для Баренцева (рис. 4).

Дисперсия данных по содержанию ОВ в ДО исследованных морей характеризуется относительно

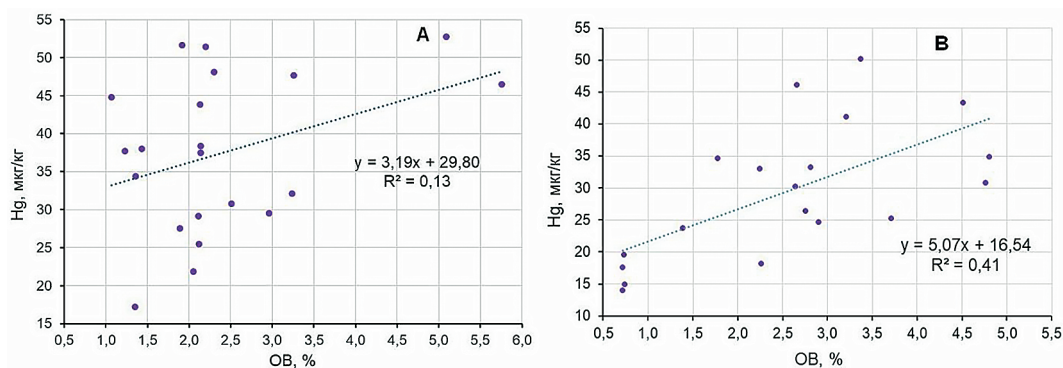


Рис. 4. Связь содержания ртути с содержанием ОБ в ДО Карского (А) и Баренцева (В) морей

Fig. 4. The relationship of mercury content with the content of organic matter (LOI) in bottom sediments of the Kara (A) and Barents (B) seas

высокими значениями. Коэффициенты вариации (CV) в случае Баренцева и Карского морей составляют 51,9 и 49,1% соответственно.

В дополнение к сказанному можно отметить высокий уровень корреляции ОБ с глубиной в Карском море, $R_p=0,76$. В Баренцевом море корреляционная связь содержания ОБ с глубиной слабая: $R_p=0,40$. Средняя глубина на исследованных станциях составила для Баренцева моря 91 м, для Карского – 115 м.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученное в исследовании среднее содержание ртути в ДО юго-восточной части Баренцева моря (Печорское море) оказалось намного ниже такового, известного ранее этой акватории – 90 мкг/кг [Новиков и др., 2019], но медианы содержания Hg – 30 мкг/кг в сравниваемых случаях совпадают. С учётом того, что распределение вышеприведённых опубликованных данных «ПИНРО» им. Н.М. Книповича по Печорскому морю не соответствовало нормальному, на основании медианных значений можно говорить о значительном сходстве полученных результатов по содержанию Hg в ДО юго-восточной части Баренцева моря. В целом, для Печорского моря характерно наличие участков высокого содержания Hg в ДО: среднее значение кларка концентрации по этому морю – 1,89 при медиане – 0,6 [Новиков, 2017; Новиков и др., 2019]. Считается, что в случае Hg имеют место очевидные признаки техногенного загрязнения ДО Баренцева моря [Гуревич, 2002]. В юго-восточной части моря это может быть связано с деятельностью нефтедобывающего комплекса, а также влияния стока р. Печора.

Среднее содержание Hg в ДО Карского моря 37,5 мкг/кг оказалось ближе к среднему её содержанию в ДО всей акватории Баренцева моря, составляющему по ранее полученным нами данным 58 мкг/кг [Новиков, 2017]. В работе В.И. Гуревича [2002] для ДО

Западно-Арктического шельфа, включающего Баренцево и Карское моря, приводится среднее значение содержания ртути 38 мкг/кг, почти совпадающее с полученными нами данными по Карскому морю.

Дно Карского моря в районе исследований имеет сложный рассечённый рельеф [Добровольский, Залогин, 1982], который, вероятно, и обуславливает упомянутую выше заметную связь накопления ОБ с глубиной. Несмотря на олиготрофный характер Карского моря [Кравчишина и др., 2015; Суханова и др., 2010] и большие поступления терригенного ОБ, поставляемого сибирскими реками, доля ОБ морского генезиса в современных ДО оказывается сопоставимой с долей ОБ, поступившего с суши [Ветров, Романкевич, 2011; Леин и др., 2013].

Согласно М. Bensharada с соавт. [Bensharada et al., 2022], содержание ОБ (LOI_{550}) в мелком илистом песке (silty fine-sand) отложений Доггербанки в Северном море у берегов Восточной Англии составило 4,11%. Измерения, выполненные теми же авторами на том же материале, но с использованием более распространённого и точного метода термогравиметрического анализа (TGA) дали результат 4,0%. Этот результат соответствует полученным в настоящей работе данным, согласно которым содержание ОБ в исследованных акваториях находилось в диапазоне от 0,72 до 5,76%.

Если исходить из известного соотношения, предложенного W. Deen [Deen, 1964], согласно которому содержание Сорг составляет примерно половину от LOI, то содержание Сорг в ДО Баренцева и Карского морей по нашим данным составит около 1,28 и 1,19%, соответственно. Согласно известным данным, среднее содержание Сорг в ДО Баренцева моря – 1,28-1,39% [Горшкова, 1975; Новиков, Драганов, 2021]. По другим данным, для юго-восточной части Баренцева моря (Печорское море) характерны значения Сорг 1,02%

[Pathirana et al., 2014]. В научной литературе встречаются и другие, более низкие значения содержания Сорг в ДО акватории Печорского моря 0,49-0,62 % [Романкевич, Ветров, 2021]. В любом случае мы имеем значения одного порядка. Следует также учесть фактор мозаичного распределения ДО различного состава по исследуемой акватории, иными словами – известную вариабельность измеряемых показателей. В таблице на ряде станций отмечены достаточно низкие значения ОБ, а значит и Сорг. Среднее вычисленное нами содержание Сорг в ДО Карского моря также достаточно близко к ранее опубликованным аналогичным данным для этого моря – 0,83 % [Беляев и др., 2009]. Согласно другим известным данным, среднее содержание Сорг в поверхностном слое ДО (алевропелит) западной части Карского моря в 2019 г. составляло 0,75 % [Немировская, Флинт, 2022]. По данным этих же авторов, содержание Сорг в алевропелите участка геохимического барьера Обская губа-взморье (Карское море) в 2016-2018 гг. в среднем составляло 1,07-1,14%.

В Баренцевом море поток оседающего на дно ОБ терригенного происхождения, в целом, заметно меньше, чем в Карском, при этом он более равномерно распределён по акватории [Ветров, Романкевич, 2011]. Незначительная разница значений содержания ОБ в ДО юго-восточной части Баренцева и юго-западной части Карского морей свидетельствует в пользу связи генезиса ОБ донных осадков на сравниваемых акваториях. В основе, вероятно, лежит ОБ терригенного происхождения, попадающего в море за счёт стока р. Печоры и рек Оби и Енисея, соответственно. Кроме того, существует активный водообмен между юго-восточной частью Баренцева моря (Печорским морем) и юго-западной частью Карского через пролив Карские ворота, при этом поток баренцевоморских вод в Карское море может быть достаточно высок [Кузнецов, 1983; Экосистема Карского..., 2008; Benzik et al., 2021].

Преобладание мелкодисперсных фракций (мелкий алеврит, пелит) в ДО юго-восточной части Карского моря [Гуревич, 2002] не оказало заметного влияния на общее содержание ОБ. В связи с этим можно отметить, что И.А. Немировской и М.В. Флинтом [2022] на примере ДО из Карского моря показано, что в противоположность существующим представлениям содержание Сорг, а значит в известной степени и ОБ (потери при прокаливании) в них не зависит от гранулометрического состава ДО. Вероятно, это прямое следствие биотурбирования осадков и активности микроорганизмов в верхнем слое осадков [Stevenson et al., 2020]. Тем не менее, здесь, вероятно, прослеживается

влияние осаднения в исследованной части Карского моря взвеси (детрита) преимущественно терригенного происхождения, поступающей с южного о-ва Новой Земли, и мелкодисперсной речной взвеси, проходящей через маргинальные фильтры Оби и Енисея, причём, не только с водой, но и со льдом. Взвесь может приноситься стоковым Обь-Енисейским и Ямальским течениями. Этот фактор, по всей видимости, и обусловил увеличение содержания Hg в ДО Карского моря на 27 % по сравнению с юго-восточной частью Баренцева моря.

Отмеченная выше положительная связь содержания ОБ с глубиной в Карском море позволяет говорить о существовании придонных латеральных, вдольсклоновых потоков осадочного вещества и о его осаднении (накоплении) в седиментационных ловушках [Ветров, Романкевич, 2011].

На основе результатов корреляционного анализа пары ОБ-Hg можно отметить, что в Печорском море ртуть, в основном, связана с содержанием ОБ. Такое распределение можно считать вполне закономерным. Баренцево море – высоко продуктивный водоём, здесь значительно больше видовое разнообразие и биомасса планктона, чем в Карском, последняя значительно убывает в направлении с запада на восток [Агатова, 2017; Добровольский, Залогин, 1982]. В олиготрофном Карском море повышенное содержание Hg в ДО, скорее, связано с потоками местного загрязнения, например, с Павловского полиметаллического месторождения, расположенного на юге архипелага Новая Земля [Черкасова и др., 2021]. Однако, следует отметить, что полученных данных пока недостаточно для развития выдвинутых предположений. Авторы планируют проведение дальнейших исследований в данном направлении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований показано, что различия в среднем содержании ОБ в ДО юго-восточной части Баренцева моря и юго-западной Карского моря незначительны. Полученные уровни содержания общего органического вещества (в среднем 2,4-2,6%) в целом характерны для ДО морей российского сектора Арктики.

Среднее содержание Hg в ДО юго-западной части Карского моря существенно, на 27 %, выше, чем в юго-восточной части Баренцева моря. Это позволяет делать вывод о том, что источники поступления ртути в указанные районы Баренцева и Карского морей не одинаковы. Повышенное содержание ртути в ДО Карского моря, вероятно, в заметной степени связано с выносом загрязнения водами рек Обь и Енисей,

а также поступлением этого металла с поверхности южного острова архипелага Новая Земля.

Все выдвинутые выше предположения нуждаются в проверке, которая будет выполнена в ходе дальнейших исследований авторов на новом материале донных осадков, собранных в изучаемом регионе в 2021-2022 гг.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

Работа не имела дополнительного спонсорского финансирования.

ЛИТЕРАТУРА

- Агапова А.И. 2017. Органическое вещество в морях России. М.: Изд-во ВНИРО. 260 с.
- Беляев Н.А., Поняев М.С., Пересыпкин В.И. 2009. Органический углерод верхнего слоя донных осадков западной части Карского моря // Геология морей и океанов: Мат. XVIII Межд. науч. конф. (Школы) по морской геологии. М.: ГЕОС. Т. I. С. 17-20.
- Ветров А.А., Романкевич Е.А. 2011. Генезис органического вещества донных осадков Карского моря // Океанология. Т. 51. № 4. С. 649-657.
- Ветров А.А., Романкевич Е.А. 2001. Потоки органического углерода в арктических морях России // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М.: Научный Мир. С. 227-234.
- Голубева Н.И., Матишов Г.Г., Бурцева Л.В. 2005. Выпадения тяжёлых металлов из атмосферы с осадками в регионе Баренцева моря // ДАН. Т. 401. № 5. С. 683-686.
- Горшкова Т.И. 1975. Органическое вещество современных шельфовых осадков северных морей СССР // Проблемы геологии шельфа. М.: Наука, С. 66-72.
- Гуревич В.И. 2002. Современный седиментогенез и геоэкология Западно-Арктического шельфа Евразии. М.: Научный мир. 135 с.
- Добровольский А.Д., Залогин Б.С. 1982. Моря СССР. М.: Изд-во МГУ. 146 с.
- Захарченко А.В., Тигеев А.А., Пасько О.А., Колесниченко Л.Г., Московченко Д.В. 2020. Региональный и локальный геохимические переносы веществ, депонированные в снеговом покрове // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. № 6. С. 41-53. DOI: 10.31857/S0869780920060119
- Кравчишина М.Д., Леин А.Ю., Суханова И.Н., Артемьев В.А., Новигатский А.Н. 2015. Генезис и пространственное распределение концентрации взвеси в Карском море в период наибольшего сокращения Арктической ледовой шапки // Океанология. Т. 55. № 4. С. 687-708. DOI: 10.7868/S0030157415030089
- Кузнецов И.М. 1983. О ледообмене через пролив Карские ворота // Труды ААНИИ. Т. 380, Гидрология Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеиздат. С. 123-128.
- Леин А.Ю., Маккавеев П.Н., Саввичев А.С., Кравчишина М.Д., Беляев Н.А., Дара О.М., Поняев М.С., Захарова Е.Е., Розанов А.Г., Иванов М.В., Флинт М.В. 2013. Процессы трансформации взвеси в осадок в Карском море // Океанология. Т. 53. № 5. С. 643-679. DOI: 10.7868/S0030157413050080
- Немировская И.А., Флинт М.В. 2022. Особенности поведения органических соединений в воде и донных осадках в Карском море во время схода сезонного льда // Океанология. Т. 62. № 1. С. 64-74. DOI: 10.31857/S0030157422010117
- Новиков М.А. 2017. К вопросу о фоновых значениях уровней содержания тяжелых металлов в донных отложениях Баренцева моря // Вестник МГТУ. Т. 20. № 1/2. С. 280-288. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-280-288
- Новиков М.А. 2021. Стойкие органические загрязнители в донных отложениях Баренцева моря // Водные ресурсы. Т. 48. № 3. С. 334-343. DOI: 10.31857/S032105962103010X
- Новиков М.А., Титов О.В., Жилин А.Ю. 2019. Содержание металлов в донных отложениях центральной части Печорского моря в современный период // Вестник МГТУ. Т. 22. № 1. С. 188-198. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-188-198
- Новиков М.А., Драганов Д.М. 2021. Атлас загрязнения донных отложений Баренцева моря. Мурманск: ПИНРО им. Н.М. Книповича. 183 с.
- Ожигин В.К., Ившин В.А., Трофимов А.Г., Карсаков А.Л., Анциферов М.Ю. 2016. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: ПИНРО. 260 с.
- Романкевич Е.А., Ветров А.А. 2021. Углерод в Мировом океане. М.: ГЕОС, 352 с. DOI: 10.34756/GEOS.2021.16.37857
- Суханова И.Н., Флинт М.В., Мошаров С.А., Сергеева В.М. 2010. Структура сообществ фитопланктона и первичная продукция в обском эстуарии и на прилежащем Карском шельфе // Океанология. Т. 50. № 5. С. 785-800.
- Черкасова Е.В., Мироненко М.В., Сидкина Е.С. 2021. Кинетико-термодинамическое моделирование кислотного ёдренажа объединённой технологической пробы с месторождения Павловское (архипелаг Новая Земля, о. Южный). Предварительная оценка // Геохимия. Т. 66. № 2. С. 183-190, DOI: 10.31857/S0016752521020035
- Экосистема Карского моря 2008 / Б.Ф. Прищепа ред. Мурманск: Изд-во ПИНРО. 261 с.
- Aksentov K. I., Astakhov A. S., Ivanov M. V., Alatortsev A. V., Sattarova V. V., Mariash A. A., Shi X., Hu L., Melgunov M. S. 2021. Assessment of mercury levels in modern sediments of the East Siberian Sea // Marine Pollution Bulletin. Vol. 168. (112426). DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112426

- AMAP Assessment 2002: Heavy Metals in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). 2005. Oslo, Norway. 265 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.2437.4160
- AMAP Assessment 2011: Mercury in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). 2011. Oslo, Norway. 193 p.
- Ball D.F. 1964. Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils // *J. Soil Sci.* V. 15. P. 84-92.
- Bank M.S., Frantzen S., Duinker A., Amouroux D., Tessier E., Nedreaas K., Maage A., Nilsen B. M. 2021. Rapid Temporal Decline of Mercury in Greenland Halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) // *Environmental Pollution*. V. 289. Is. 117843. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117843
- Beldowski J., Miotk M., Zaborska A., Pempkowiak J. 2015. Distribution of sedimentary mercury off Svalbard, European Arctic // *Chemosphere*. V. 122. P. 190-198. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.11.050
- Bensharada M., Telford R., Stern B., Gaffney V. 2022. Loss on ignition vs. thermogravimetric analysis: a comparative study to determine organic matter and carbonate content in sediments // *J. Paleolimnol.* V. 67. P. 191-197. DOI: 10.1007/s10933-021-00209-6
- Benzik A.N., Orlov A.M., Novikov M.A. 2021. Marine seabed litter in Siberian Arctic: a first attempt to assess // *Marine Pollution Bulletin*. V. 172. Is. 112836. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112836
- Boszke L., Kowalski A., Glosifiska G., Szarek R., Siepak J. 2003. Environmental factors affecting speciation of mercury in the bottom sediments; an overview // *Polish Journal of Environmental Studies*. V. 12. No. 1. P. 5-13.
- Coquery M., Cossa D., Martin J.M. 1995. The distribution of dissolved and particulate mercury in three Siberian estuaries and adjacent Arctic coastal waters // *Water, Air, and Soil Pollution*. V. 80, P. 653-664. DOI: 10.1007/BF01189718
- Dean W.E. 1974. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods // *J. Sed. Petrol.* V. 44. P. 242-248.
- Fedorov Y.A., Ovsepyan A.E., Zimovets A.A., Savitskiy V.A., Dotsenko I.V., Lisitsyn A.P., Shevchenko V.P., Navigatsky A.N. 2019. Mercury Distribution in Bottom Sediments of the White Sea and the Rivers of Its Basin // *Sedimentation Processes in the White Sea*. / A.P. Lisitsyn, L.L. Demina ed. P. 208-241. DOI: 10.1007/978-3-030-05111-2
- Golubeva N., Burtseva L., Matishov G. 2003. Measurements of mercury in the near-surface layer of the atmosphere of the Russian Arctic // *Science of the total environment*. V. 306. No. 1/3. P. 3-9. DOI: 10.1016/S0048-9697(02)00480-1
- Hansen B., Osterhus S., Gould W.J., Rickards L.J. 1998. North Atlantic-Norwegian Sea Exchanges: the ICES NANSEN Project // *North Atlantic-Norwegian Sea Exchanges: the ICES NANSEN Project*. ICES Cooperative Res. Rep. № 225. P. 3-82.
- Ji X., Abakumov E., Xie X. 2019. Atmosphere-ocean exchange of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Russian Arctic Ocean // *Atmospheric Chemistry and Physics*. V. 19. No. 22. P. 13789-13807. DOI: 10.5194/acp-19-13789-2019
- Loring D.H., Dahle S., Naes K., Santos D., Skei J.M., Matishov G.G. 1998. Arsenic and other trace metals in sediments from the Kara Sea and the Ob and Yenisey estuaries, Russia // *Aquatic Geochemistry*. V. 4. P. 233-252. DOI: 10.1023/A:1009691314353
- Pathirana I., Knies J., Felix M., Mann U. 2014. Towards an improved organic carbon budget for the western Barents Sea shelf // *Climate of the Past*. V. 10. P. 569-587. DOI: 10.5194/cp-10-569-2014
- Pavlov V.K., Pfirman S.L. 1995. Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. V. 42. No. 6. P. 1369-1390, DOI: 10.1016/0967-0645(95)00046-1
- Rodrigues P.A., Ferrari R.G., Santos L.N., Junior A.C. 2019. Mercury in aquatic fauna contamination: A systematic review on its dynamics and potential health risks // *Journal of Environmental Sciences (Beijing, China)*. V. 84. P. 205-218. DOI: 10.1016/j.jes.2019.02.018.
- Ryaboshapko A., Bullock R., Ebinghaus R., Ilyin I., Lohman K., Munthe J., Petersen G., Seigneur Ch., Wängberg I. 2002. Comparison of mercury chemistry models // *Atmospheric Environment*. V. 36. Is. 24. P. 3881-3898. DOI: 10.1016/S1352-2310(02)00351-5
- Siegel F.R., Kravitz J.H., Galasso J.J. 2001. Arsenic and mercury contamination in 31 cores taken in 1965, St. Anna Trough, Kara Sea, Arctic Ocean // *Environmental Geology*. V. 40, P. 528-542. DOI: 10.1007/s002540000194
- Sommar J., Andersson M.E., Jacobi H.-W. 2010. Circumpolar measurements of speciated mercury, ozone and carbon monoxide in the boundary layer of the Arctic Ocean // *Atmospheric Chemistry and Physics*. V. 10:5031-5045. DOI: 10.5194/acp-10-5031-2010
- Stevenson M.A., Faust J.C., Andrade L.L., Freitas F.S., Gray N.D., Tait K., Hendry K.R., Hilton R.G., Henley S.F., Tessin A., Leary P., Papadaki S., Ford A., März C., Abbott G.D. 2020. Transformation of organic matter in a Barents Sea sediment profile: coupled geochemical and microbiological processes // *Phil. Trans. R. Soc. A* 378: 20200223. DOI: 10.1098/rsta.2020.0223

REFERENCES

- Agatova A.I. 2017. Organic matter in the seas of Russia. Moscow: VNIRO Publish. 260 p. (In Russ.).
- Belyaev N.A. M. Ponyatov.S., Peresykin V.I. 2009. Organic carbon of the upper layer of bottom sediments of the western part of the Kara Sea // *Geology of the seas and oceans: proceedings of the XVIII International Scientific Conference (school) on marine Geology*. Moscow: GEOS. V. I. P. 17-20. (In Russ.).
- Vetrov A.A., Romankevich E.A. 2011. The genesis of the organic matter of the bottom sediments of the Kara Sea // *Oceanology*. V.51. No. 4. P. 649-657. (In Russ.).

- Vetrov A.A., Romankevich E.A. 2001. Organic carbon fluxes in the Arctic seas of Russia // Experience of systemic oceanological research in the Arctic. Moscow: Nauchny Mir. P. 227-234. (In Russ.).
- Golubeva N.I., Matishov G.G., Burtseva L.V. 2005. Precipitation of heavy metals from the atmosphere with precipitation in the Barents Sea region // DAS. V. 401. No. 5. P. 683-686. (In Russ.).
- Gorshkova T.I. 1975. Organic matter of modern shelf sediments of the northern seas of the USSR // Problems of shelf geology. Moscow: Nauka, P. 66-72. (In Russ.).
- Gurevich V.I. 2002. Modern sedimentogenesis and geoecology of the Western Arctic shelf of Eurasia. Moscow: Scientific world. 135 p. (In Russ.).
- Dobrovolsky A.D., Zalogin B.S. 1982. Seas of the USSR. Moscow: Moscow SU Publish. 146 p. (In Russ.).
- Zakharchenko A.V., Tigeev A.A., Pasko O.A., Kolesnichenko L.G., Moskovchenko D.V. 2020. Regional and local geochemical transfers of substances deposited in snow cover // Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology. No. 6. P. 41-53. DOI: 10.31857/S0869780920060119. (In Russ.).
- Kravchishina M.D., Lein A.Yu., Sukhanova I.N., Artem'ev V.A., Novigatsky A.N. 2015. Genesis and spatial distribution of suspended particulate matter concentrations in the Kara Sea during maximum reduction of the Arctic ice sheet // Oceanology. V. 55. No. 4. P. 623-643. DOI: 10.1134/S000143701503008X
- Kuznetsov I.M. 1983. On ice exchange through the Kara Gate Strait // Proceedings of the AANIA. V. 380. Hydrology of the Arctic Ocean. Leningrad: Hydrometeoizdat. P. 123-128. (In Russ.).
- Lein A.Yu., Makkaveev P.N., Savvichev A.S., Kravchishina M.D., Belyaev N.A., Dara O.M., Ponyaev M.S., Zakharova E.E., Rozanov A.G., Ivanov M.V., Flint M.V. 2013. The processes of transformation of suspension into sediment in the Kara Sea // Oceanology. V. 53. No. 5. P. 643-679. DOI: 10.7868/S0030157413050080. (In Russ.).
- Nemirovskaya I.A., Flint M.V. 2022. Features of the behavior of organic compounds in water and bottom sediments in the Kara Sea during the descent of seasonal ice // Oceanology. V. 62. No. 1. P. 64-74. DOI: 10.31857/S0030157422010117. (In Russ.).
- Novikov M.A. 2017. On the issue of background values of heavy metal levels in the bottom sediments of the Barents Sea // Bulletin of the Moscow STU. V. 20. No. 1/2. P. 280-288. DOI: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-280-288. (In Russ.).
- Novikov M.A. 2021. Persistent organic pollutants in bottom sediments of the Barents Sea // Water resources. V. 48. No. 3. P. 334-343. DOI: 10.31857/S032105962103010X. (In Russ.).
- Novikov M.A., Titov O.V., Zhilin A.Yu. 2019. Metal content in bottom sediments of the central part of the Pechora Sea in the modern period // Bulletin of the MSTU. V. 22. No. 1. P. 188-198. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-1-188-198. (In Russ.).
- Novikov M.A., Draganov D.M. 2021. Atlas of pollution of bottom sediments of the Barents Sea. Murmansk: N.M. Knipovich PINRO Publish. 183 p. (In Russ.).
- Ozhigin V.K., Ivshin V.A., Trofimov A.G., Karsakov A.L., Antsiferov M.Yu. 2016. The waters of the Barents Sea: structure, circulation, variability. Murmansk: PINRO Publish. 260 p. (In Russ.).
- Romankevich E.A., Vetrov A.A. 2021. Carbon in the oceans. Moscow: GEOS press. 352 p. DOI: 10.34756/GEOS.2021.16.37857. (In Russ.).
- Sukhanova I.N., Flint M.V., Mosharov S.A., Sergeeva V.M. 2010. Structure of the phytoplankton communities and primary production in the Ob River estuary and over the adjacent Kara Sea shelf // Oceanology. V. 50. No. 5. P. 743-758. DOI: 10.1134/S0001437010050115
- Cherkasova E.V., Mironenko M.V., Sidkina E.S. 2021. Kinetic and thermodynamic modeling of acid drainage of a combined technological sample from the Pavlovskoye field (Novaya Zemlya Archipelago, Yuzhny Island). preliminary assessment // Geochemistry. V. 66. No. 2. P. 183-190, DOI: 10.31857/S0016752521020035. (In Russ.).
- Ecosystem of the Kara Sea 2008. / B.F. Prishchepa ed. Murmansk: PINRO Publish. 261 p. (In Russ.).
- Aksentov K.I., Astakhov A.S., Ivanov M.V., Alatorstev A.V., Sattarova V.V., Mariash A.A., Shi X., Hu L., Melgunov M.S. 2021. Assessment of mercury levels in modern sediments of the East Siberian Sea // Marine Pollution Bulletin. Vol. 168. (112426). DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112426
- AMAP Assessment 2002: Heavy Metals in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). 2005. Oslo, Norway. 265 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.2437.4160
- AMAP Assessment 2011: Mercury in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). 2011. Oslo, Norway. 193 p.
- Ball D.F. 1964. Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils // J. Soil Sci. V. 15. P. 84-92.
- Bank M.S., Frantzen S., Duinker A., Amouroux D., Tessier E., Nedreaas K., Maage A., Nilsen B. M. 2021. Rapid Temporal Decline of Mercury in Greenland Halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) // Environmental Pollution. V. 289. Is. 117843. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117843
- Beldowski J., Miotk M., Zaborska A., Pempkowiak J. 2015. Distribution of sedimentary mercury off Svalbard, European Arctic // Chemosphere. V. 122. P. 190-198. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.11.050
- Bensharada M., Telford R., Stern B., Gaffney V. 2022. Loss on ignition vs. thermogravimetric analysis: a comparative study to determine organic matter and carbonate content in sediments // J. Paleolimnol. V. 67. P. 191-197. DOI: 10.1007/s10933-021-00209-6
- Benzik A.N., Orlov A.M., Novikov M.A. 2021. Marine seabed litter in Siberian Arctic: a first attempt to assess // Marine Pollution Bulletin. V. 172. Is. 112836. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112836

- Boszke L., Kowalski A., Glosifiska G. Szarek R., Siepak J. 2003. Environmental factors affecting speciation of mercury in the bottom sediments; an overview // Polish Journal of Environmental Studies. V. 12. No. 1. P. 5-13.
- Coquery M., Cossa D., Martin J.M. 1995. The distribution of dissolved and particulate mercury in three Siberian estuaries and adjacent Arctic coastal waters // Water, Air, and Soil Pollution. V. 80, P. 653-664. DOI: 10.1007/BF01189718
- Dean W.E. 1974. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods // J. Sed. Petrol. V. 44. P. 242-248.
- Fedorov Y.A., Ovsepyan A.E., Zimovets A.A., Savitskiy V.A., Dotsenko I.V., Lisitsyn A.P., Shevchenko V.P., Novigatsky A.N. 2019. Mercury Distribution in Bottom Sediments of the White Sea and the Rivers of Its Basin // Sedimentation Processes in the White Sea. / A.P. Lisitsyn, L.L. Demina ed. P. 208-241. DOI: 10.1007/978-3-030-05111-2
- Golubeva N., Burtseva L., Matishov G. 2003. Measurements of mercury in the near-surface layer of the atmosphere of the Russian Arctic // Science of the total environment. V. 306. No. 1/3. P. 3-9. DOI: 10.1016/S0048-9697(02)00480-1
- Hansen B., Osterhus S., Gould W.J., Rickards L.J. 1998. North Atlantic-Norwegian Sea Exchanges: the ICES NANSEN Project // North Atlantic-Norwegian Sea Exchanges: the ICES NANSEN Project. ICES Cooperative Res. Rep. № 225. P. 3-82.
- Ji X., Abakumov E., Xie X. 2019. Atmosphere-ocean exchange of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Russian Arctic Ocean // Atmospheric Chemistry and Physics. V. 19. No. 22. P. 13789-13807. DOI: 10.5194/acp-19-13789-2019
- Loring D.H., Dahle S., Naes K., Santos D., Skei J.M., Matishov G.G. 1998. Arsenic and other trace metals in sediments from the Kara Sea and the Ob and Yenisey estuaries, Russia // Aquatic Geochemistry. V. 4. P. 233-252. DOI: 10.1023/A:1009691314353
- Pathirana I., Knies J., Felix M., Mann U. 2014. Towards an improved organic carbon budget for the western Barents Sea shelf // Climate of the Past. V. 10. P. 569-587. DOI: 10.5194/cp-10-569-2014
- Pavlov V.K., Pfirmann S.L. 1995. Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. V. 42. No. 6. P. 1369-1390, DOI: 10.1016/0967-0645(95)00046-1
- Rodrigues P.A., Ferrari R.G., Santos L.N., Junior A.C. 2019. Mercury in aquatic fauna contamination: A systematic review on its dynamics and potential health risks // Journal of Environmental Sciences (Beijing, China). V. 84. P. 205-218. DOI: 10.1016/j.jes.2019.02.018.
- Ryaboshapko A., Bullock R., Ebinghaus R., Ilyin I., Lohman K., Munthe J., Petersen G., Seigneur Ch., Wängberg I. 2002. Comparison of mercury chemistry models // Atmospheric Environment. V. 36. Is. 24. P. 3881-3898. DOI: 10.1016/S1352-2310(02)00351-5
- Siegel F.R., Kravitz J.H., Galasso J.J. 2001. Arsenic and mercury contamination in 31 cores taken in 1965, St. Anna Trough, Kara Sea, Arctic Ocean // Environmental Geology. V. 40, P. 528-542. DOI: 10.1007/s002540000194
- Sommar J., Andersson M.E., Jacobi H.-W. 2010. Circumpolar measurements of speciated mercury, ozone and carbon monoxide in the boundary layer of the Arctic Ocean // Atmospheric Chemistry and Physics. V. 10:5031-5045. DOI: 10.5194/acp-10-5031-2010
- Stevenson M.A., Faust J.C., Andrade L.L., Freitas F.S., Gray N.D., Tait K., Hendry K.R., Hilton R.G., Henley S.F., Tessin A., Leary P., Papadaki S., Ford A., März C., Abbott G.D. 2020. Transformation of organic matter in a Barents Sea sediment profile: coupled geochemical and microbiological processes // Phil. Trans. R. Soc. A 378: 20200223. DOI: 10.1098/rsta.2020.0223

Поступила в редакцию 11.09.2024 г.
Принята после рецензии 02.10.2024 г.