

УДК 551.468:550.42

М. А. Новиков, Д. М. Драганов

Загрязнение воды и донных отложений тяжелыми металлами в области полярного фронта Баренцева моря

На основе многолетних данных рассмотрена проблема загрязнения воды и донных отложений в области полярного фронта Баренцева моря тяжелыми металлами Cu, Ni, Co, Cd, Hg, Zn, Pb и Cr. Предпосылка для выполнения исследований заключалась в наличии объемной базы данных ФГБНУ "ПИНРО" о содержании металлов в поверхностном слое воды и донных отложениях Баренцева моря. На первом этапе работы с использованием ГИС-технологий и математической статистики из указанной базы были выделены и обработаны результаты исследований, полученные в период 2001–2013 гг. на 32 станциях, расположенных в области полярного фронта. В соответствии с предложенными ПИНРО методиками были вычислены фоновые значения содержания перечисленных металлов в воде и донных отложениях этого фронта – зонах контакта и трансформации атлантической и арктической водных масс. Полученные результаты в большинстве случаев превышали значения, установленные для соседних водных масс. В результате исследований были построены карты-схемы распределения загрязнения морской воды и донных отложений тяжелыми металлами (под загрязнением понималось содержание металлов в концентрациях, превышающих фоновый уровень); сделан вывод об устойчивом техногенном загрязнении вод в области полярного фронта Баренцева моря тяжелыми металлами, а также донных отложений – ртутью (в осенний период). Обосновано предположение, что фронтальная зона аккумулирует загрязнение, поступающее из соседних контактирующих водных масс (атлантической и арктической). Показано, что загрязнение воды фронтальной зоны в основном не сопровождалось загрязнением нижележащих донных отложений. В отношении содержания Ni, Cr и Pb в донных отложениях можно говорить о выявлении положительных локальных геохимических аномалий.

Ключевые слова: Баренцево море, вода, тяжелые металлы, полярный фронт, загрязнение.

Введение

Загрязнение среды обитания арктических морей, в том числе тяжелыми металлами (ТМ), – важнейшая экологическая проблема современного общества¹ [1]. Одним из основных путей поступления загрязнения в Арктику является дальний атмосферный перенос микроэлементов и поллютантов (прежде всего с аэрозолями) [2; 3]. Содержание ТМ в атмосферных осадках, выпадающих над Северным Ледовитым океаном, может быть достаточно высоким, в отдельных случаях в разы превышает предельно допустимые значения для морских вод (это касается, например, концентраций Ni, Fe и Zn) [4].

На этапе общей оценки степени загрязнения тяжелыми металлами экосистемы Баренцева моря нами проведены исследования, позволившие установить современные фоновые уровни содержания ТМ в донных отложениях (ДО) и основных водных массах (ВМ) Баренцева моря [5–7]. Результаты указанных работ позволили оценить степень загрязнения ТМ каждой из четырех основных водных масс и донных отложений, выявили концентрацию загрязнения в зоне контакта атлантической и арктической ВМ в области полярного фронта. Эта область часто характеризовалась самыми высокими значениями средних концентраций ТМ по сравнению с таковыми в остальной части Баренцева моря, что способствовало постановке нами следующей задачи – провести отдельную оценку уровней загрязнения морской среды в упомянутой полярной фронтальной зоне.

Фронтальная зона в северо-западной и северной частях Баренцева моря получила название "полярный фронт" в первой половине XX в. [8] и была определена как морская зона, отделяющая теплые и соленые атлантические воды от холодных и опресненных арктических вод, т. е. являющаяся по своей природе термохалинной. Специализированные исследования полярного фронта впервые были проведены норвежскими специалистами [9] в районе к юго-востоку от о. Медвежий. В результате выполненных работ было установлено, что положение фронта определяется особенностями донной топографии, а выявленные небольшие его колебания в пространстве происходят под воздействием приливов. Амплитуда этих колебаний не превышает 10 миль [9; 10].

Полярный фронт, строго говоря, не является водной массой; это зона трансформации вод различного происхождения. Тем не менее площадь акватории зоны полярного фронта (фронтальной зоны) составляет около 11 750 км², что вполне достаточно для выполнения специальных исследований. Согласно известному определению "фронтальная зона представляет собой некоторое пространство, в котором происходит взаимодействие различных по своим характеристикам вод и которое в первом приближении может быть

¹ См.: AMAP Assessment 2002: Human Health in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, 2003. 137 p. ; AMAP Assessment 2002: Heavy Metals in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment programme (AMAP). Oslo, 2005. 265 p.

определено как пространство, расположенное в пределах границ, где происходят сезонные и межгодовые изменения положения фронта" [11, с. 5]. Предпосылкой для наших исследований является наличие собственной базы данных по содержанию ТМ в поверхностном слое воды и ДО Баренцева моря в области полярного фронта. Уточним, что под областью полярного фронта в настоящей статье понимается фронтальная зона и прилегающие к ней с севера и юга акватории смежных ВМ.

Материалы и методы

Материалом для исследований служили пробы поверхностного слоя воды (0–2 м) и ДО, отобранные сотрудниками ПИНРО в морских экспедициях по исследованию состояния морских биологических ресурсов и среды их обитания. Пробы воды отбирали пластиковым батометром Нискина объемом 5 или 10 л. Поверхностный слой осадка отбирался с использованием дночерпателя Ван Вина. Основной объем материала был собран в экспедициях научно-исследовательских судов ПИНРО "Смоленск", "Вильнюс" и "Фритъоф Нансен" в период 1998–2016 гг. (всего 574 станции). Выполненные станции донных отложений по своему положению не всегда совпадали со станциями отбора проб воды.

В процессе решения поставленной задачи с учетом известных данных и подхода специалистов ПИНРО к выделению ВМ [10; 12] в среде ГИС-приложения ArcGIS 10 были нанесены на карту границы пяти типов вод на акватории Баренцева моря (атлантические, арктические), два типа прибрежных вод и воды фронтальной зоны – области смешения атлантической и арктической ВМ (рис. 1).

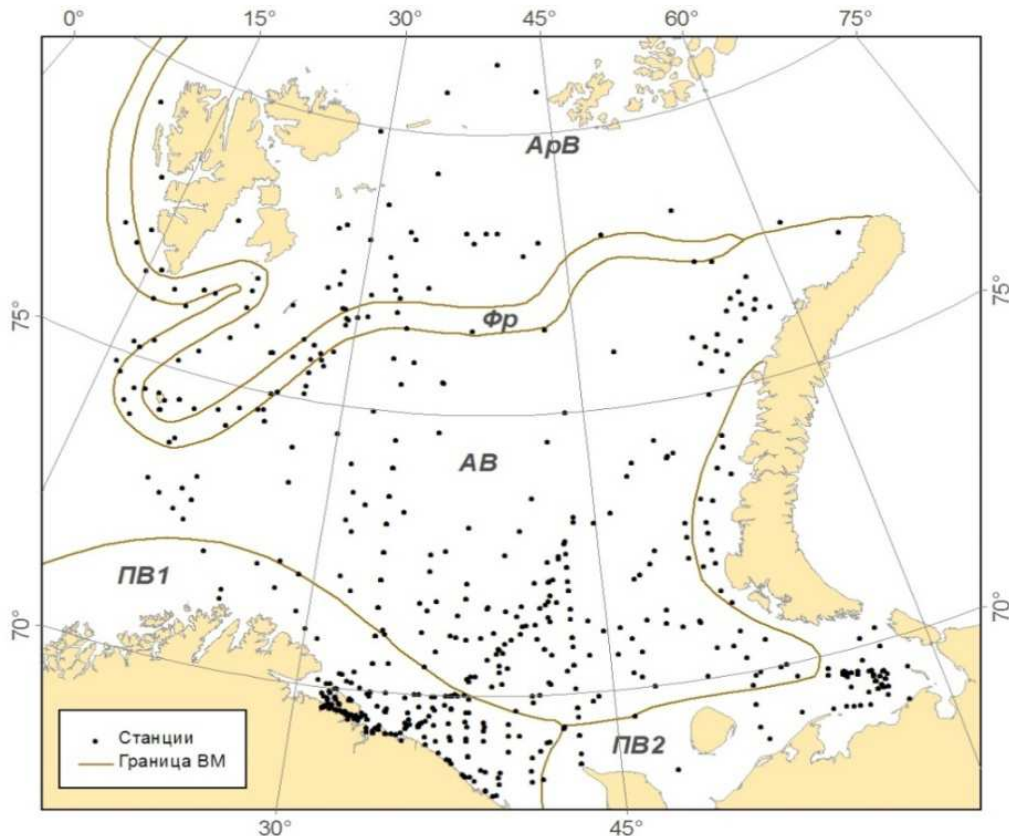


Рис. 1. Выполненные в период 1998–2016 гг. станции и основные ВМ Баренцева моря: АВ – атлантические и собственно баренцевоморские воды; ApB – арктические воды; PB1 – норвежские и мурманские прибрежные воды, PB2 – беломорские и печорские прибрежные воды, Фр – воды фронтальной зоны
Fig. 1. Stations made in 1998–2016 and main water masses (BM) of the Barents Sea: AB – Atlantic and properly Barents Sea waters; ApB – Arctic water; PB1 – Norwegian and Murmansk coastal waters; PB2 – White Sea and Pechora coastal waters; Фр – waters of the frontal zone

Приведенная на карте фронтальная зона (Фр) в современном представлении является квазистационарной климатической халинной. Она проходит вдоль западных берегов о-ва Западный Шпицберген по западной, южной и восточной кромке Шпицбергенской банки и далее вдоль южного склона возвышенности Персея в восточном направлении между 76° и 77° с. ш. Эта Фр относится к северной периферии области распространения вод атлантического происхождения и никак не связана с опреснением поверхностного слоя вод у ледовой кромки при ее отступлении на север в теплую часть года [10].

С использованием модуля пространственных операций ArcGIS 10 из рабочей базы информации по Баренцеву морю были отобраны данные, географически относящиеся к области полярного фронта.

В итоге было обнаружено и выделено 32 станции (рис. 1, область Фр), выполненные в сентябре – ноябре в период 2001–2013 гг. Данные по этим станциям были включены в дальнейшую обработку.

Всего в области полярного фронта на 32 станциях было обработано 43 пробы и определено содержание Cu, Ni, Co, Cd, Hg, Zn, Pb и Cr в поверхностном слое нефилтрованной морской воды (на ряде станций брали по две пробы), а также в 32 пробах выявлено содержание ТМ в ДО. Основное количество проб пришлось на 2002, 2005 и 2006 гг. Отбор указанных проб в один сезон (осень), безусловно, облегчает сравнение многолетних данных, но, с другой стороны, может "включать" фактор сезонности регистрируемых в воде концентраций ТМ.

Уровни содержания ТМ (кроме Hg) в морской воде определяли в лаборатории прикладной экологии и токсикологии ФГБНУ "ПИНРО" методом атомно-абсорбционной спектроскопии в соответствии с методическим руководством ПНД Ф 14.1:2.214-06. Общую ртуть выявляли методом беспламенной атомно-абсорбционной спектрофотометрии на гидридной приставке к атомно-абсорбционному спектрофотометру фирмы Shimadzu, модель AA-6800 (Япония) с использованием многоуровневой калибровки методом холодного пара. Полученные значения концентраций ТМ в морской воде выражали в мкг/л. Уровни содержания металлов в ДО Баренцева моря определялись там же методом атомно-абсорбционной спектроскопии в соответствии с известной методикой². Полученные значения содержания ТМ выражали в мкг/г сухой массы осадка.

Статистический анализ полученных данных осуществляли в среде прикладных компьютерных программ Statistica 10 и R. В целях пространственного анализа результатов в среде ArcGIS 10 выполняли карты-схемы распределения высоких уровней содержания изученных ТМ в воде и ДО Баренцева моря. Под высокими понимали уровни содержания ТМ, превышающие установленные фоновые значения, т. е. техногенное загрязнение. В качестве базовой карты использовалась стандартная карта береговой линии из базы данных ArcGIS 10.

Результаты и обсуждение

Существование различных ВМ в Баренцевом море носит устойчивый характер, их границы относительно стабильны в сезонном и межгодовом аспектах. В основе выделения ВМ лежат параметры температуры и солености, обработанные с использованием кластерного анализа [10; 12]. Ранее нами было показано, что ВМ Баренцева моря характеризуются специфичностью своего химического состава, обусловленной различными средними концентрациями в воде микроэлементов и органических поллютантов [7]. Аналогичный вывод был сделан и для области полярного фронта, однако вопрос об уровнях концентраций ТМ в зоне полярного фронта нами ранее не рассматривался. Этому вопросу посвящено настоящее исследование.

В табл. 1 приведены основные результаты статистической обработки данных о содержании металлов в водах фронтальной зоны ($n = 43$). Здесь и ниже среднее значение рассчитывалось как среднее арифметическое. Для всех случаев методом Шапиро – Уилка было установлено, что распределение случайной величины отличалось от нормального. Для сравнения: в нижней части таблицы приведены наши статистические данные по ТМ в прилегающих к этой области арктической (с севера) и атлантической (с юга) ВМ.

Таблица 1. Результаты статистической обработки данных о содержании ТМ в воде полярного фронта по сравнению с соседними ВМ Баренцева моря. CO – величина стандартного отклонения
Table 1. The results of statistical processing of data on the content of heavy metals in the Polar Front waters compared to the neighbouring Barents Sea water masses. CO is the value of the standard deviation

| Показатель | Концентрация металлов, мкг/л | | | | | | | |
|----------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|
| | Ni | Cu | Cr | Pb | Zn | Hg | Co | Cd |
| Фронтальная зона | | | | | | | | |
| Среднее значение | 0,650 | 1,541 | 2,857 | 0,389 | 16,182 | 0,0095 | 0,054 | 0,088 |
| CO | 0,499 | 2,553 | 2,043 | 0,736 | 9,7920 | 0,0222 | 0,146 | 0,167 |
| 95 перцентиль | 1,30 | 2,19 | 6,74 | 1,88 | 33,12 | 0,052 | 0,43 | 0,49 |
| Арктическая водная масса | | | | | | | | |
| Среднее значение | 0,483 | 0,985 | 1,948 | 0,098 | 11,632 | 0,0107 | 0,098 | 0,0528 |
| CO | 0,634 | 0,757 | 2,023 | 0,270 | 7,138 | 0,0207 | 0,164 | 0,1458 |
| 95 перцентиль | 1,20 | 2,04 | 5,65 | 0,50 | 24,2 | 0,050 | 0,43 | 0,30 |
| Атлантическая водная масса | | | | | | | | |
| Среднее значение | 1,073 | 1,267 | 2,529 | 0,180 | 13,949 | 0,0172 | 0,166 | 0,144 |
| CO | 1,545 | 2,047 | 1,822 | 0,307 | 14,121 | 0,0239 | 0,201 | 0,569 |
| 95 перцентиль | 4,28 | 3,31 | 5,10 | 0,70 | 40,1 | 0,070 | 0,57 | 0,60 |

² Методика количественного химического анализа. Определение As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Sn, Zn (кислоторастворимые формы) в почвах и донных отложениях атомно-абсорбционным методом. СПб., 2005. 25 с.

Из табл. 1 видно, что среднее содержание Cu, Cr, Pb и Zn в воде фронтальной зоны выше, чем в обеих соседних ВМ. Расчетные фоновые уровни ТМ для Cr и Pb также оказались выше, чем в арктической и атлантической ВМ. При этом следует отметить, что в отличие от арктической, атлантическая водная масса в Баренцевом море относится к одной из наиболее загрязненных [6; 7]. Уточним, что согласно предложенной нами методике [6] фоновые значения ТМ для вод полярного фронта равны величинам 95 процентиля, приведенным в табл. 1. Таким образом, можно утверждать, что полярный фронт, по существу являясь узкой пограничной акваторией, не достаточно объемной для существования собственных устойчивых источников загрязнения, определенным образом аккумулирует загрязнение, поступающее с соседних акваторий. Это предположение подтверждается анализом картографической информации, представленной на рис. 2 и 3.

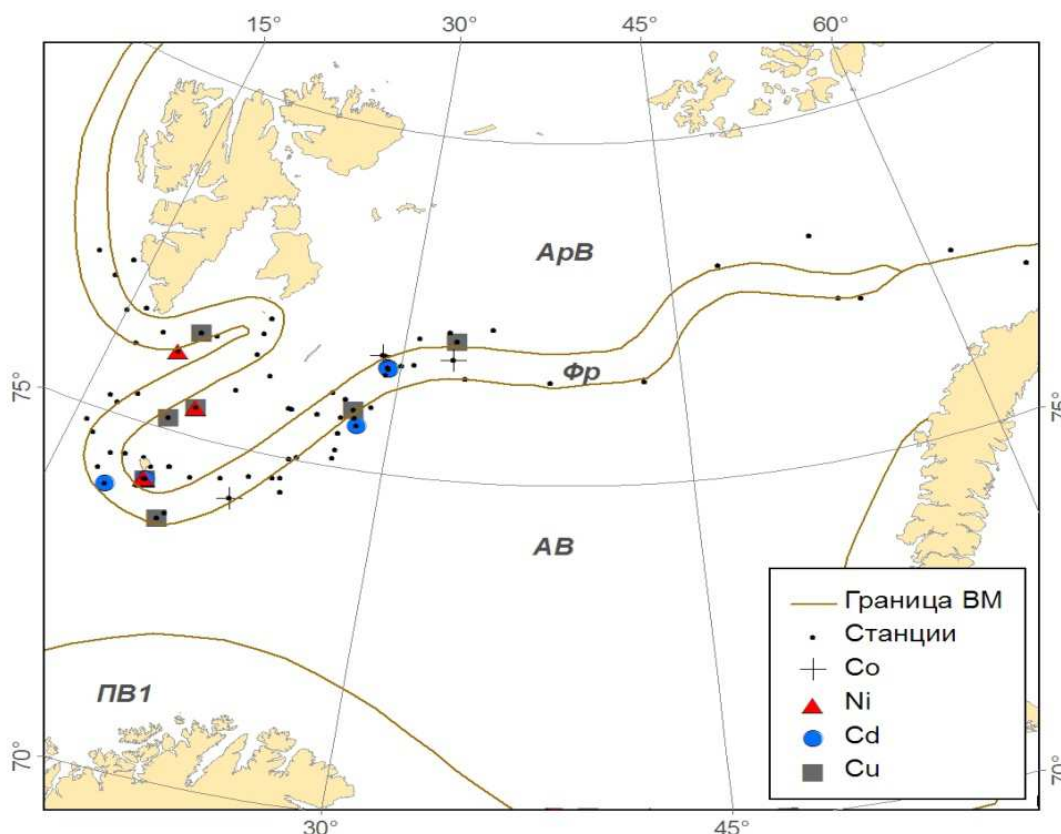


Рис. 2. Выполненные станции и распределение загрязнения Cd, Co, Cu и Ni в воде зоны полярного фронта и прилегающих к ней акваторий Баренцева моря. Обозначения ВМ такие же, как на рис. 1
Fig. 2. Stations made and distribution of contaminants Cd, Co, Cu and Ni in the waters of the Polar Front area and the adjacent water areas of the Barents Sea. Water masses (BM) are shown as in Fig. 1

С целью лучшего отображения ситуации на обеих картах приведена картина распространения техногенного загрязнения ТМ для станций, выполненных не только в зоне полярного фронта (Фр), но и в прилегающих к ней с севера и юга узких полосах акваторий арктической и атлантической ВМ соответственно (шириной до 50 км в каждую сторону). Под техногенным загрязнением понимается присутствие металлов в морской среде (вода, ДО) в концентрациях, превышающих фоновые значения. Фоновые значения рассматриваемых ТМ для основных ВМ Баренцева моря были вычислены нами ранее [6]. Информация о них также приведена выше (табл. 1, значения 95 процентиля). На рис. 2 и 3 видно, что загрязнение металлами часто наблюдается "синхронно" по обе стороны границы Фр или в самой зоне, в то время как прилегающие районы, расположенные севернее и южнее полярного фронта, характеризуются относительной чистотой. Комплексное загрязнение воды почти всеми ТМ характерно для двух областей – района о. Медвежий (74°25' с. ш., 19°00' в. д.), расположенного на западной границе арктической ВМ, а также района, расположенного в зоне контакта атлантической ВМ с Фр (координаты центра 75°49' с. ш. и 27°54' в. д.).

В связи с этим можно вспомнить одно из фундаментальных определений фронтальных зон в океане как квазистационарных или эпизодически возникающих областей повышенных (по сравнению со средними) пространственных градиентов характеристик [13]. Одним из следствий контакта вод различной температуры и солености во фронтальных зонах являются конвергентные циркуляции (круговороты), ограничивающие массообмен (солеобмен) между ними и приводящие к так называемому уплотнению

при смешении [13]. При этом фронты, представляющие собой разновидность внутренних пограничных слоев, играют роль своеобразных барьеров или мембран, через которые обмен свойствами затруднен и имеет специфические формы [14]. Таким образом, теоретические предпосылки накопления загрязнения во фронтальной зоне достаточно очевидны.

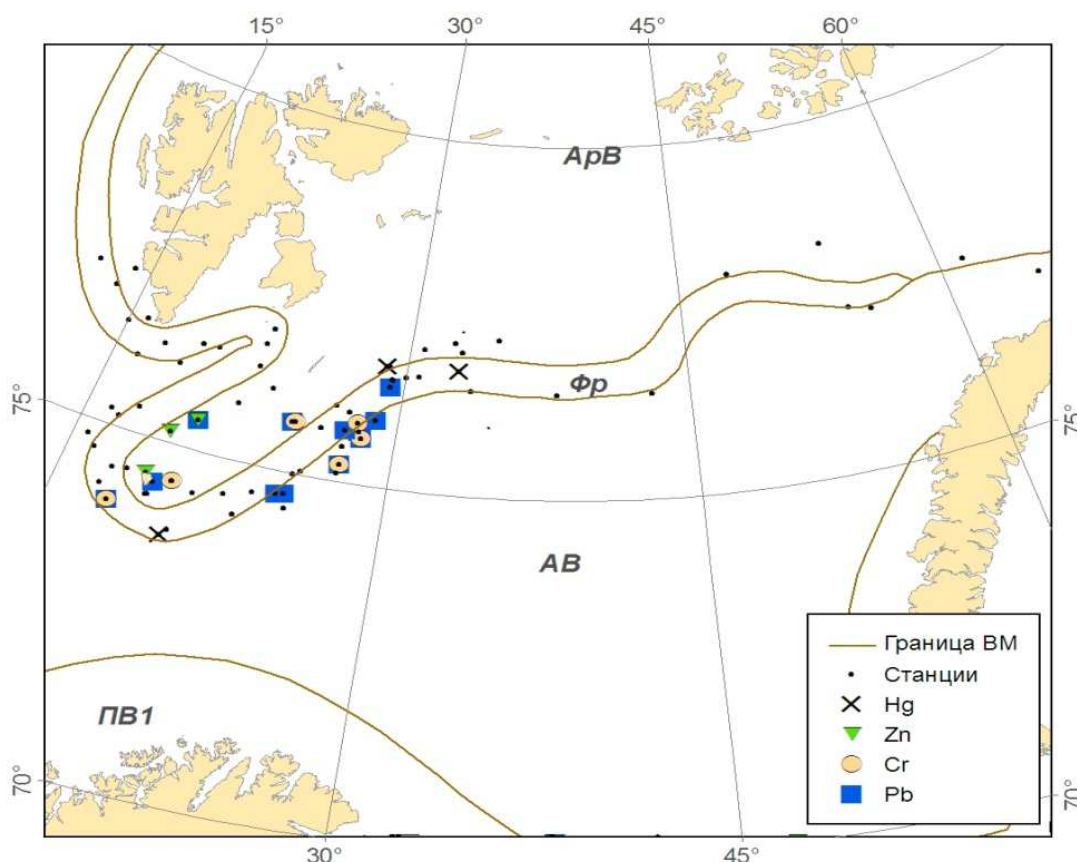


Рис. 3. Выполненные станции и распределение загрязнения Cr, Pb, Zn и Hg в воде зоны полярного фронта и прилегающих к ней акваторий Баренцева моря. Обозначения ВМ такие же, как на рис. 1

Fig. 3. Stations made and distribution of contaminants Cr, Pb, Zn and Hg in the waters of the Polar Front zone and the adjacent water areas of the Barents Sea. The water masses (BM) are shown as in Fig. 1

Для Cd и Pb характерен высокий коэффициент их концентрирования в аэрозолях [1; 15], что обеспечивает поступление данных ТМ в Баренцево море с атмосферными осадками из высокой Арктики и дальнейшее накопление в зоне полярного фронта; Zn, имеющий средний уровень концентрации в аэрозолях, также поступает в арктические моря с атмосферными осадками в результате дальнего трансграничного переноса [4]; Cr является талассофильным элементом, почти не участвует в биологических процессах и практически не удаляется при самоочищении воды [15; 16] (следовательно, аккумуляцию Cr в области полярного фронта следует связывать с влиянием исключительно природных абиотических факторов); Cu и Hg, напротив, активно удаляются из морской воды с участием органического вещества [15]. Таким образом, высокая средняя концентрация Cu может означать повышенное содержание взвешенного вещества в нефилтрованной воде фронтальной зоны, связанное с развитием морского планктона.

Очевидно, что процесс аккумуляции ТМ в области полярного фронта не может быть объяснен влиянием какого-либо одного фактора, имеет место комплекс причин, его обуславливающих. Кроме упомянутых выше физико-химических факторов, накоплению микроэлементов может способствовать массовая гибель планктонных организмов в зоне схождения (конвергенции) вод с различной температурой и соленостью [8], например, при встрече вод холодного Медвежьинского течения (арктического) с теплыми водами северной ветви Нордкапского течения (атлантического), поворачивающего в районе восточного склона Шпицбергенской банки обратно на запад. Кроме того, контакт теплых и холодных вод, перемещающихся в западном направлении вдоль склонов Шпицбергенской банки, ведет к их перемешиванию и появлению антициклонических круговоротов, приводящих к дивергенции – подъему нижележащих, обогащенных микроэлементами вод на поверхность [10].

Для области полярного фронта характерна связь его положения с донной топографией [8–10; 17]. В ходе оценки связи загрязнения воды с загрязнением ДО во фронтальной зоне была проведена статистическая обработка данных, касающихся содержания ТМ в ДО ($n = 32$, для Hg $n = 21$). Во всех случаях (кроме

данных по Zn и Hg) с помощью метода Шапиро – Уилка было установлено, что распределение случайной величины подчиняется нормальному закону.

Основные результаты статистической обработки приведены в табл. 2. Значения содержания ТМ в ДО фронтальной зоны в основном превышают показатели, характерные для всего Баренцева моря. Это прежде всего относится к содержанию Ni, Cr, Pb и Zn. Для первых трех металлов выше не только средние значения, но и уровень 97 перцентилья, что позволяет говорить о выявлении положительных локальных геохимических аномалий. Тем не менее пространственный анализ данных, представленных на рис. 4, не способствует определению географических районов аккумуляции загрязнения исследованными ТМ в ДО области полярного фронта. Возможно, для этого просто мало данных. Уточним, что в качестве фона для составления карты (рис. 4) использовались значения содержания ТМ во всем Баренцевом море, приведенные в табл. 2. В результате превышение фона отмечено для четырех металлов из шести.

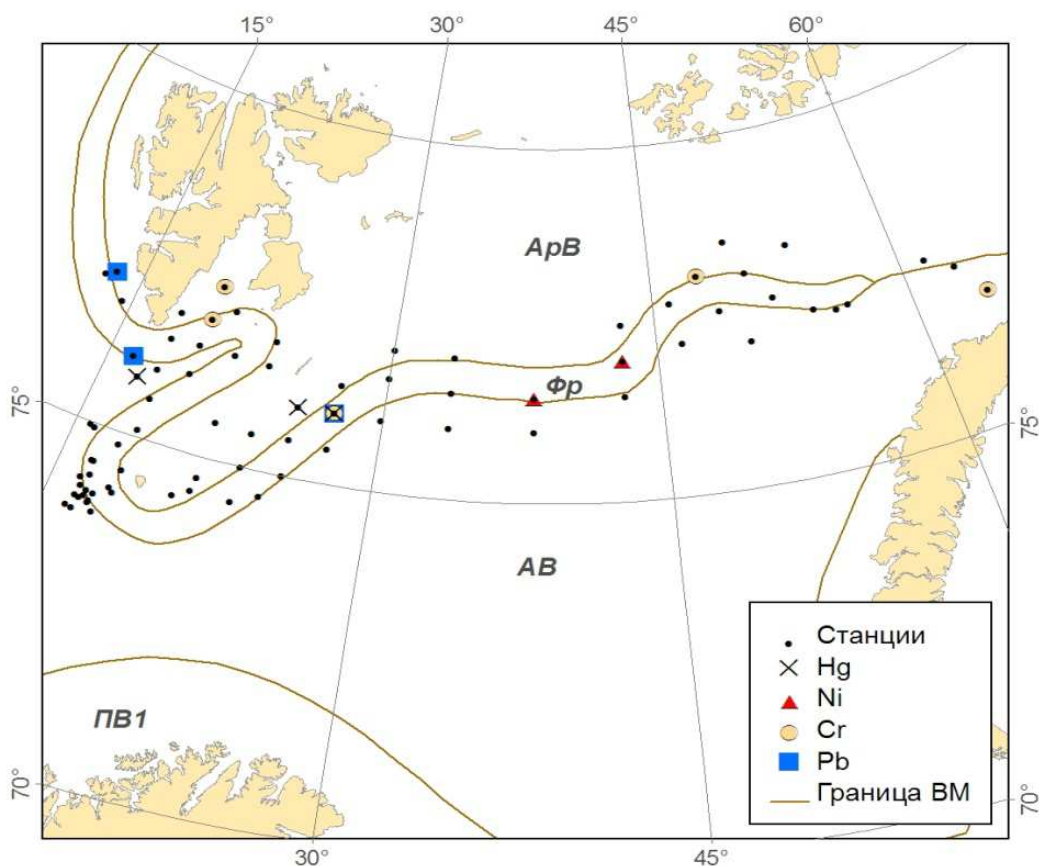


Рис. 4. Выполненные станции и распределение содержания ТМ в ДО зоны полярного фронта и прилегающих к ней акваторий Баренцева моря в количествах, превышающих фоновые значения. Обозначения ВМ такие же, как на рис. 1

Fig. 4. Stations made and the distribution of heavy metal content in the bottom sediments of the Polar Front zone and the adjacent areas of the Barents Sea in quantities exceeding the background values. Water masses (BM) are shown as in Fig. 1

Таблица 2. Результаты статистической обработки данных по содержанию ТМ в ДО полярного фронта в Баренцевом море, дополненные сведениями о фоновых значениях. ВМ – Баренцево море
Table 2. The results of statistical processing of data on the content of heavy metals in the Barents Sea Polar Front bottom sediments supplemented by information on background values: ВМ – the Barents Sea

| Показатель | Содержание металлов, мкг/г | | | | | |
|--------------------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | Ni | Cu | Cr | Pb | Zn | Hg |
| Среднее значение | 35,40 | 14,82 | 61,86 | 19,48 | 69,41 | 0,050 |
| Стандартное отклонение | 13,77 | 5,06 | 35,48 | 7,02 | 32,17 | 0,032 |
| Стандартная ошибка среднего значения | 2,43 | 0,89 | 6,27 | 1,24 | 5,69 | 0,0068 |
| 97 перцентиль | 59,1 | 23,2 | 117,0 | 32,1 | 108,2 | 0,117 |
| Среднее значение для ВМ | 29,58 | 15,45 | 52,90 | 16,05 | 61,90 | 0,058 |
| Фон для ВМ (из работы [7]) | 52 | 28 | 116 | 31 | 112 | 0,15 |

Нормальный характер распределения содержания Cu, Pb, Ni и Cr в ДО свидетельствует в пользу определенной стабильности присутствия этих ТМ на всем протяжении фронтальной зоны и не согласуется с предположением о наличии техногенного загрязнения. Напротив, есть основания говорить о существовании долговременных специфических механизмов накопления ТМ в ДО фронтальной зоны, т.е. о природных аномалиях. В отношении содержания Cu в ДО наблюдаются признаки наличия в области полярного фронта отрицательной геохимической аномалии. Только касательно Hg можно относительно уверенно говорить о техногенном загрязнении ДО западной части фронтальной зоны, так как на фоне в среднем невысокого ее содержания отмечено несколько станций, где превышен баренцевоморский фон, в том числе и в комплексе с другими ТМ.

Заключение

Проведенное исследование свидетельствует о том, что область полярного фронта в Баренцевом море характеризуется повышенным по сравнению с фоном загрязнением воды поверхностного слоя тяжелыми металлами, по крайней мере в период сентября – ноября. По всей видимости, фронтальная зона аккумулирует загрязнение, поступающее из соседних контактирующих водных масс (атлантической и арктической). Это явление обусловлено особенностями функционирования фронтальных зон в океане, где важную роль могут играть как абиотические (гидрология, атмосферные осадки, солеобмен ВМ и др.), так и биотические факторы (развитие и отмирание планктона) [8; 13; 14; 18].

Загрязнение морской воды в основном не сопровождается загрязнением нижележащих ДО относительно мелководной (глубиной около 250 м) [19] фронтальной зоны. Хотя в отношении содержания Ni, Cr и Pb в ДО можно говорить об обнаружении положительных локальных геохимических аномалий, причины которых до конца не ясны. Одной из них, очевидно, является активная гидродинамика придонных вод, приводящая к постоянному переотложению активного слоя ДО. Накопление Hg в ДО области полярного фронта, очевидно, следует рассматривать как техногенное загрязнение.

Благодарности

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику ФГБНУ "ПИНРО" В. А. Ившину за ценные замечания и консультации, а также научному сотруднику А. М. Лаптевой за неоценимую помощь при проведении лабораторных исследований.

Библиографический список

1. Диагностический анализ состояния окружающей среды Арктической зоны Российской Федерации (Расширенное резюме) / отв. ред. Б. А. Моргунов. М. : Научный мир, 2011. 200 с.
2. Шевченко В. П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике : [монография]. М. : Наука, 2006. 226 с.
3. Шевченко В. П., Виноградова А. А., Лисицын А. П. [и др.]. Атмосферные аэрозоли как источник осадочного вещества и загрязнений в Северном Ледовитом океане // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики = System of the Laptev Sea and the adjacent Arctic Seas: современное состояние и история развития : [монография]. М. : МГУ, 2009. С. 150–172.
4. Свистов П. Ф., Першина Н. А., Павлова М. Т., Полищук А. И., Семенец Е. С. Химический состав атмосферных осадков в российской Арктике в 2000–2015 гг. // Метеорология и гидрология. 2017. № 5. С. 62–68.
5. Новиков М. А. К вопросу о фоновых значениях уровней содержания тяжелых металлов в донных отложениях Баренцева моря // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20, № 1/2. С. 280–288.
6. Новиков М. А., Драганов Д. М. Комплексный методический подход к определению фоновых значений уровней содержания микроэлементов в водных массах Баренцева моря на примере Cd, Co, Cu и Ni // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. 2017. № 2 (34). С. 37–48.
7. Новиков М. А., Драганов Д. М. Пространственное распределение показателей загрязнения водных масс Баренцева моря // Водные ресурсы. 2017. Т. 44, № 5. С. 583–589.
8. Книпович Н. М. Гидрология морей и солоноватых вод. М. ; Л. : Пищепромиздат, 1938. 514 с.
9. Johannessen O. M., Foster L. A. A note on the topographically controlled oceanic Polar Front in the Barents Sea // Journal of Geophysical Research. 1978. V. 83 (C9). P. 4567–4571.
10. Ожигин В. К., Ившин В. А., Трофимов А. Г. [и др.]. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость : [монография] / отв. ред. Е. В. Сентябов. Мурманск : ПИНРО, 2016. 260 с.
11. Грузинов В. М. Гидрология фронтальных зон Мирового океана. Л. : Гидрометеиздат, 1986. 272 с.
12. Ожигин В. К., Ившин В. А. Водные массы Баренцева моря = Water masses of the Barents Sea. Мурманск : ПИНРО, 1999. 47 с.

13. Федоров К. Н. Физическая природа и структура океанических фронтов. Л. : Гидрометеоздат, 1983. 296 с.
14. Сперанская А. А. Пограничные слои в геофизической гидродинамике : автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.12. М., 1982. 45 с.
15. Добровольский В. В. Основы биогеохимии. М. : Academia, 2003. 396 с.
16. Мур Дж. В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах : Контроль и оценка влияния / под ред. Ю. Е. Саета. М. : Мир, 1987. 285 с.
17. Gawarkiewicz G., Pluedemann A. J. Topographic control of the thermohaline frontal structure in the Barents Sea Polar Front on the south flank of the Spitsbergen Bank // *Journal of Geophysical Research*. 1995. V. 100. P. 4509–4524.
18. Новиков М. А. Методология интегрированной оценки экологической уязвимости и рыбохозяйственной ценности морских акваторий (на примере Баренцева и Белого морей). Мурманск : ПИНРО, 2006. 250 с.
19. Harris C. L., Pluedemann A. J., Gawarkiewicz G. G. Water mass distribution and Polar Front structure in the western Barents Sea // *Journal of Geophysical Research*. 1998. V. 103, № 2. P. 2905–2917.

References

1. Diagnosticheskiy analiz sostoyaniya okruzhayushey sredy Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii (Rasshirennoe rezюме) [Diagnostic analysis of the environment of the Arctic Region in the Russian Federation (Extended summary)] / *otv. red. B. A. Morgunov*. М. : Nauchnyi mir, 2011. 200 p.
2. Shevchenko V. P. Vliyanie aerorozolei na sredu i morskoe osadkonakoplenie v Arktike [The impact of aerosols on the environment and marine sedimentation in the Arctic] : [monografiya]. М. : Nauka, 2006. 226 p.
3. Shevchenko V. P., Vinogradova A. A., Lisitsyn A. P. [i dr.]. Atmosfernye aerorozoli kak istochnik osadochnogo veshchestva i zagryazneniy v Severnom Ledovitom okeane [Atmospheric aerosols as a source of sediment and contaminants in the Arctic Ocean] // *Sistema morya Laptevyyh i prilegayuschih morey Arktiki = System of the Laptev Sea and the adjacent Arctic Seas: sovremennoe sostoyanie i istoriya razvitiya* : [monografiya]. М. : MGU, 2009. P. 150–172.
4. Svistov P. F., Peshina N. A., Pavlova M. T., Polischuk A. I., Semenets E. S. Himicheskiy sostav atmosfernykh osadkov v rossiyskoy Arktike v 2000–2015 gg. [Chemical composition of atmospheric precipitation in the Russian Arctic in 2000–2015] // *Meteorologiya i gidrologiya*. 2017. N 5. P. 62–68.
5. Novikov M. A. K voprosu o fonovykh znacheniyah urovney sodержaniya tyazhelykh metallov v donnykh otlozheniyah Barentseva morya [On the background values of heavy metal content in bottom sediments of the Barents Sea] // *Vestnik MGTU*. 2017. V. 20, N 1/2. P. 280–288.
6. Novikov M. A., Draganov D. M. Kompleksnyi metodicheskiy podhod k opredeleniyu fonovykh znacheniy urovney sodержaniya mikroelementov v vodnykh massah Barentseva morya na primere Cd, Co, Cu i Ni [Complex methodical approach to estimation of background levels of microelement content in water masses of the Barents Sea (Cd, Co, Cu AND Ni)] // *Vestnik KRAUNTS. Ser. Nauki o Zemle*. 2017. N 2 (34). P. 37–48.
7. Novikov M. A., Draganov D. M. Prostranstvennoe raspredelenie pokazateley zagryazneniya vodnykh mass Barentseva morya [Spatial distribution of water mass pollution characteristics in the Barents Sea] // *Vodnye resursy*. 2017. V. 44, N 5. P. 583–589.
8. Knipovich N. M. Gidrologiya morey i solonovatykh vod [Hydrography of seas and brackwaters]. М. ; L. : Pishchepromizdat, 1938. 514 p.
9. Johannessen O. M., Foster L. A. A note on the topographically controlled oceanic Polar Front in the Barents Sea // *Journal of Geophysical Research*. 1978. V. 83 (C9). P. 4567–4571.
10. Ozhigin V. K., Ivshin V. A., Trofimov A. G. [i dr.]. Vody Barentseva morya: struktura, tsirkulyatsiya, izmenchivost [The Barents Sea water: Structure, circulation, variability] : [monografiya] / *otv. red. E. V. Sentyabov*. Murmansk : PINRO, 2016. 260 p.
11. Gruzinov V. M. Gidrologiya frontalnykh zon Mirovogo okeana [Hydrology of frontal zones of the World Ocean]. L. : Gidrometeoizdat, 1986. 272 p.
12. Ozhigin V. K., Ivshin V. A. Vodnye massy Barentseva morya [Water masses of the Barents Sea]. Murmansk : PINRO, 1999. 47 p.
13. Fedorov K. N. Fizicheskaya priroda i struktura okeanicheskikh frontov [Physical nature and structure of oceanic fronts]. L. : Gidrometeoizdat, 1983. 296 p.
14. Speranskaya A. A. Pogranichnye slои v геофизической гидродинамике [Boundary layers in geophysical hydrodynamics] : *avtoref. dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk* : 01.04.12. М., 1982. 45 p.
15. Dobrovolskiy V. V. Osnovy biogeohimii [Fundamentals of biogeochemistry]. М. : Academia, 2003. 396 p.

16. Moore J. W., Ramamoorthy P. Tyazhelye metally v prirodnyh vodah : Kontrol i otsenka vliyaniya [Heavy metals in natural waters : Applied monitoring and impact assessment] / pod red. Yu. E. Saeta. M. : Mir, 1987. 285 p.

17. Gawarkiewicz G., Pluedemann A. J. Topographic control of the thermohaline frontal structure in the Barents Sea Polar Front on the south flank of the Spitsbergen Bank // Journal of Geophysical Research. 1995. V. 100. P. 4509–4524.

18. Novikov M. A. Metodologiya integrirovannoy otsenki ekologicheskoy uyazvimosti i rybohozyaystvennoy tsennosti morskikh akvatoriy (na primere Barentseva i Belogo morey) [Methodology of integrated assessment of the ecological vulnerability and fishery significance of marine water areas: Case study of the Barents and White Seas]. Murmansk : PINRO, 2006. 250 p.

19. Harris C. L., Pluedemann A. J., Gawarkiewicz G. G. Water mass distribution and Polar Front structure in the western Barents Sea // Journal of Geophysical Research. 1998. V. 103, N 2. P. 2905–2917.

Сведения об авторах

Новиков Михаил Аркадьевич – ул. Академика Книповича, 6, г. Мурманск, Россия, 183038; Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича, канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: mnovik@pinro.ru

Novikov M. A. – 6, Academician Knipovich Str., Murmansk, Russia, 183038; Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (PINRO), Cand. of Biol. Sci., Leading Scientist; e-mail: mnovik@pinro.ru

Драганов Дмитрий Михайлович – ул. Академика Книповича, 6, г. Мурманск, Россия, 183038; Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича, мл. науч. сотрудник; e-mail: draganov@pinro.ru

Draganov D. M. – 6, Academician Knipovich Str., Murmansk, Russia, 183038; Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (PINRO), Junior Researcher; e-mail: draganov@pinro.ru

M. A. Novikov, D. M. Draganov

Pollution of water and bottom sediments of the Polar Front area in the Barents Sea with heavy metals

Pollution of the Barents Sea water and bottom sediments in the Polar Front area with heavy metals including Cu, Ni, Co, Cd, Hg, Zn, Pb and Cr has been considered based on the long-term data. The existence of a voluminous own database of Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (PINRO) on the content of metals in the surface layer of water and bottom sediments of the Barents Sea is the prerequisite for carrying out the research. At the first stage of the study, the data from 32 stations located in the Polar Front zone and obtained in the period from 2001 to 2013 have been derived and processed using GIS technologies and mathematical statistics from the database. Further, based on methods previously proposed by PINRO, the background values of the content of the listed metals in water and bottom sediments of the Polar Front, the zone of contact and transformation of the Atlantic and Arctic water masses have been calculated. In most cases, the values obtained have exceeded those established for neighboring water masses. As a result of the research, the maps of distribution of the pollution of sea water and bottom sediments with heavy metals have been made. Pollution is understood as the content of metals in concentrations exceeding the background level. It has been concluded about the persistent anthropogenic contamination of the Barents Sea Polar Front waters with some heavy metals, as well as of its bottom sediments with mercury in autumn period. The assumption has been made that the frontal zone accumulated the pollution coming from neighbouring contacting Atlantic and Arctic water masses. It has been shown that the pollution of the water in the frontal zone is mostly not accompanied by contamination of the underlying bottom sediments. With respect to the content of Ni, Cr and Pb in bottom sediments, one can speak of the detection of positive local geochemical anomalies.

Key words: Barents Sea, seawater, heavy metals, Polar Front, pollution.