

УДК 551.468:550.4(268.45)

ЗОНЫ АККУМУЛЯЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

© 2022 г. М. А. Новиков*

*Полярный филиал Всероссийского научно-исследовательского института
рыбного хозяйства и океанографии (“ПИНРО” им. Н.М. Книповича), Мурманск, Россия***e-mail: mnovik@pinro.ru*

Поступила в редакцию 29.03.2021 г.

После доработки 10.11.2021 г.

Принята к публикации 16.12.2021 г.

На основе данных многолетних исследований (2002–2018 гг.), выполненных “ПИНРО” им. Н.М. Книповича, рассмотрена проблема выделения зон депонирования загрязнения в донных отложениях Баренцева моря. Для решения основной задачи исследования применены ГИС-технологии и геостатистический анализ данных по содержанию тяжелых металлов и хлорорганических соединений. В качестве основного показателя комплексного загрязнения акватории и с целью выделения зон аккумуляции предложено использовать сумму нормированных значений содержания Cu, Ni, Pb, Zn, Cr, Hg, ГХБ, суммы ГХЦГ, ДДТ и ПХБ в донных отложениях. Нормирование выполнено по значению среднего арифметического содержания каждого поллютанта в осадке. В качестве критерия выделения областей депонирования техногенного загрязнения было предложено среднее значение суммы поллютантов, рассчитанное интерполяционной моделью. В результате выполненного исследования выделено 3 основных области депонирования загрязнения тяжелыми металлами в Баренцевом море. Сделан вывод о том, что загрязнение поступает в области аккумуляции с разных направлений. Одним из основных источников загрязнения, вероятно, является таяние ледников на арктических архипелагах в результате глобального потепления в последние два десятилетия.

Ключевые слова: Баренцево море, донные отложения, тяжелые металлы, хлорорганические соединения, области аккумуляции

DOI: 10.31857/S0030157422040098

ВВЕДЕНИЕ

При анализе проблематики загрязнения Арктики большое практическое и теоретическое значение имеет выявление мест его депонирования как конечных (иногда промежуточных) пунктов миграции от природных и техногенных источников [2]. Последние могут находиться за сотни и тысячи километров от мест депонирования. Выявление, а также океанографический и геостатистический анализ зон аккумуляции загрязнения на шельфе может дать дополнительную информацию о направлении и путях поступления загрязнения. В отношении тяжелых металлов (ТМ) под природным загрязнением следует рассматривать, главным образом, абразию берегов, вулканическую и сейсмическую активность как на суше, так и морском дне, а также биологические процессы. Антропогенное загрязнение в открытом море и в Арктике, в частности, следует связывать с дальним трансграничным переносом аэрозолей в атмосфере и загрязненных взвесей морскими течениями, а также гравитационными процессами донной транспортировки, ледовым разносом и

льдообразованием [10, 12–14, 31–33, 38]. Отдельный вклад в загрязнение вносит судоходство (транспорт, рыболовство, военно-морской флот) и речной сток.

Хлорорганические соединения (ХОС) – пестициды и полихлоробифенилы (ПХБ), поступающие в Арктику в основном в результате дальнего трансграничного переноса, обладают рядом общих свойств, таких как крайне высокая токсичность, способность накапливаться в тканях животных и растений. ХОС длительное время сохраняются в окружающей среде, в том числе почве и донных осадках, весьма медленно разрушаясь под воздействием природных факторов. Считают, что воздействие ХОС на биоту и человека значительно более сильно в Арктике, чем в низких широтах [36–39, 46].

Известно, что морские донные отложения (ДО) гораздо более стабильны во времени и пространстве, чем водные массы, поэтому они способны к накоплению “информации” о внешних воздействиях, имевших место в прошлом. Кроме того, коэффициенты накопления загрязняющих ве-

ществ в ДО значительны (10^3 – 10^4), что связано с высокой адсорбционной способностью грунтов и более низкой по сравнению с водой скоростью распада сложных органических соединений [8].

Накопленные за последние годы обширные данные по распространению ТМ в ДО Баренцева моря позволяют говорить о том, что особенности гидродинамики и рельефа дна последнего, а также поступление загрязнения в экосистему с разных направлений в результате трансграничного переноса, обуславливают неравномерное загрязнение его акватории. Общие представления о том, что антропогенное загрязнение в море имеет обыкновенное накапливаться в морских впадинах (желобах), в отношении Баренцева моря верны лишь отчасти. Сложная система поверхностных, контурных, придонных и других течений приводит к накоплению металлов не только на дне желобов, но и на их склонах, причем места депонирования загрязнения могут находиться в весьма отдаленных друг от друга частях Баренцева моря [26–28]. При этом, как показано нами ранее, различные ТМ в целом имеют заметные отличия в местах локализации их максимальных содержаний в ДО, например, наиболее высокое содержание хрома отмечено в северо-восточной части моря, а свинца – в Медвежинском желобе в западной части [26, 27].

Целью наших исследований было: 1) с использованием геостатистического анализа на основе ГИС-технологий выявить зоны комплексного загрязнения, или наибольшего суммарного содержания ТМ и ХОС в ДО Баренцева моря; 2) оценить океанографические факторы, влияющие на образование зон депонирования техногенного загрязнения в Баренцевом море.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом для исследований служили результаты лабораторного количественного химического анализа 679 проб ДО на содержание ТМ (Cu, Ni, Pb, Zn, Cr и Hg), а также 625 проб на содержание ХОС. Суммарное содержание ХОС рассчитывали на основе содержаний гексахлорбензола (ГХБ), гексахлорциклогексана (ГХЦГ), дихлордифенилтрихлорэтана (ДДТ) и ПХБ. Пробы были отобраны сотрудниками ПИНРО в экспедициях научно-исследовательских судов при выполнении задач мониторинга водных биологических ресурсов и среды их обитания в Баренцевом море в период с 2002 по 2018 гг. Для отбора проб ДО использовали дночерпатель Ван Вина с площадью захвата не менее 0.1 м^2 . При отборе пробы брали верхний (0–2 см) слой осадка. На каждой станции брали одну пробу. Отобранные пробы замораживали при температуре минус 20°C и доставляли в стационарную лабораторию.

Содержание ТМ определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии в соответствии с известным методическим руководством [20]. Fe, Cu, Cd, Zn, Ni, Pb, Mn определяли на спектрофотометре фирмы “Shimadzu”, модель AA-6800 (Япония), в пламени воздух/ацетилен с дейтериевой коррекцией фона и использованием многоуровневой калибровки тестовыми смесями, приготовленными из аттестованных стандартных растворов тяжелых металлов фирмы “Shimadzu” (Япония). Общую ртуть определяли методом непламенной атомно-абсорбционной спектрофотометрии на гидридной приставке к атомно-абсорбционному спектрофотометру с использованием многоуровневой калибровки методом “холодного пара”.

Определение содержания хлорорганических пестицидов ГХБ, ГХЦГ и ДДТ в пробах ДО выполняли методом капиллярной газовой хроматографии по методике М-МВИ-209-08 [18]. Пестициды из ДО экстрагировали органическими растворителями – смесью *n*-гексана и ацетона в отношении 3 : 1, на ультразвуковой бане в течение 30 мин. Пестициды α -, β -, γ -ГХЦГ, ГХБ и метаболиты ДДТ (o,p'-ДДЕ, p,p'-ДДЕ, o,p'-ДДД, p,p'-ДДД, o,p'-ДДТ, p,p'-ДДТ) определяли методом капиллярной газовой хроматографии на хромато-масс-спектрометре GCMS-QP2010 Plus “Shimadzu” (Япония) с капиллярной кварцевой колонкой длиной 30 м. Содержание ПХБ анализировали тем же методом по соответствующей методике (М-МВИ-09-97) [19]. ПХБ из ДО экстрагировали также смесью *n*-гексана и ацетона в отношении 3 : 1 на ультразвуковой бане в течение 30 мин. Определяли конгенеры ПХБ с номерами по номенклатуре IUPAC: 28, 31, 52, 99, 101, 105, 118, 138, 153, 156, 180. Идентификация индивидуальных соединений проводилась в режиме SIM (метод выбранных ионов). Количественное определение выполнялось с использованием калибровки тестовыми смесями. Для обработки результатов применялась программа GCMSsolution 2.5 фирмы “Shimadzu”.

Полученные значения содержания ТМ в ДО выражали в мкг/г сухой массы осадка, а суммы ХОС в нг/г сухой массы осадка.

Станции отбора проб ДО на ТМ распределялись практически по всей акватории Баренцева моря (рис. 1). Содержание ХОС определяли на тех же станциях, что и ТМ, но с незначительными пропусками. Карта станций, где определяли содержание ХОС, представлена ниже при обсуждении результатов.

С целью выявления районов комплексного загрязнения ДО Баренцева моря, вначале мы предприняли попытку суммирования данных по содержанию ТМ. Для этого на первом этапе было произведено нормирование фактических значе-

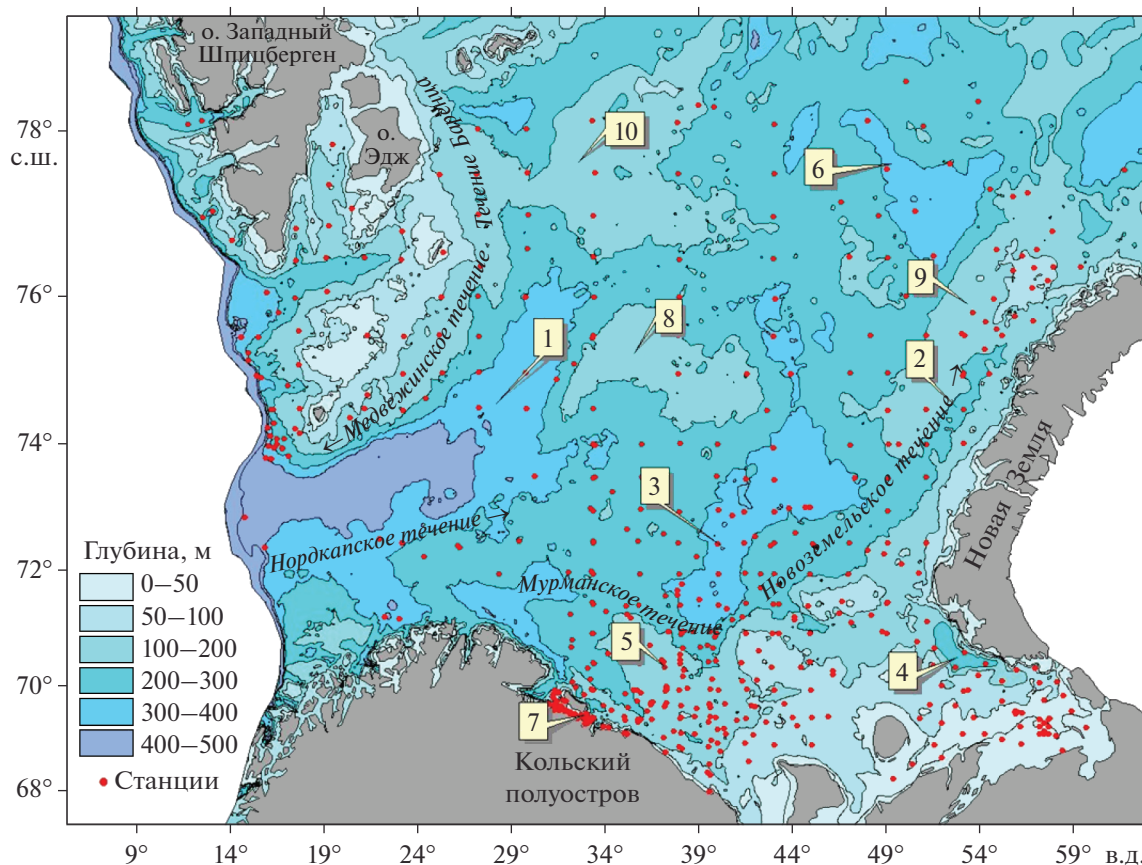


Рис. 1. Карта Баренцева моря с батиметрией и течениями. Цифрами обозначены: 1 – Медвежинский желоб, 2 – Западно-Новоземельский желоб, 3 – Центральная впадина (желоб), 4 – Южно-Новоземельский желоб, 5 – Мурманская банка, 6 – впадина Альбанова, 7 – Западный Мурман, 8 – Центральная возвышенность, 9 – Новоземельская банка, 10 – возвышенность Персея.

ний содержания каждого ТМ по среднему арифметическому значению для выборки ($n = 679$). Данная процедура на следующем этапе позволила получить значение суммы нормированного содержания ТМ для каждой станции. При вычислении суммы содержания ТМ складывали только значения нормированного содержания металлов, которые были ≥ 1 . Если значения по всем ТМ на станции были ниже единицы, то сумма принималась за ноль. Последние значения необходимо было учесть при построении карт интерполяции данных, не пропуская такие станции. Содержание ТМ меньше 1 было отнесено нами к особенностям геохимического фона региона (отрицательные аномалии), способным помешать выявлению районов депонирования техногенного загрязнения [26, 28].

Аналогично рассчитывали сумму нормированных содержаний ХОС (ГХБ + ГХЦГ + ДДТ + ПХБ) и включали ее в общий результат.

Картографирование, включая геостатистический анализ, выполняли в среде ГИС-приложения Arcview 3.2. Карты выполнены в проекции

Меркатора. Статистическую обработку данных производили в среде программного пакета Statistica 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованное ранее содержание отдельных ТМ в ДО Баренцева моря выявило основные районы аккумуляции отдельных элементов: Рb – в Медвежинском желобе, Сг – в Западно-Новоземельском желобе и к юго-востоку от побережья Шпицбергена, Си – в Центральной впадине (желобе) и склонах соседней Гусиной банки, Нг – в Центральной впадине и на Мурманской банке [26, 27] (см. рис. 1). Были отмечены некоторые основные районы комплексного загрязнения ДО Баренцева моря металлами, а именно: прибрежная зона Западного Мурмана, включая выход из Кольского залива, и восточный склон Центральной впадины, включая западный склон Гусиной банки. Упомянутые районы комплексного загрязнения ДО определялись нами по положению станций с уровнем содержания отдельных ТМ

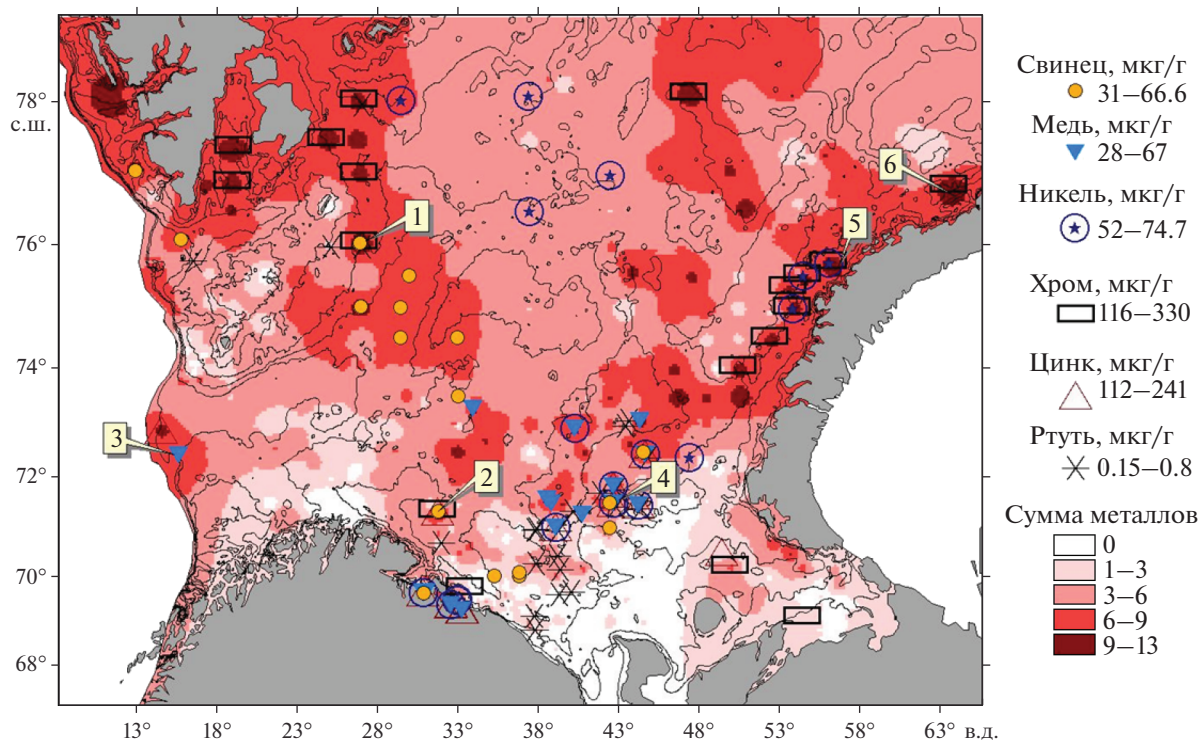


Рис. 2. Распределение суммы содержаний изученных ТМ, превышающих средние значения в ДО Баренцева моря. Значками показаны станции с содержанием ТМ выше фоновых уровней. 1 – северо-восточный склон Шпицбергенской банки, 2 – западный склон Мурманской банки, 3 – верховье долины Персея, 4 – восточный склон Центрального желоба (западный склон Гусиной банки), 5 – район зал. Вилькицкого и Норденшельда, 6 – район зал. Иностранцева. Тонкие линии – изобаты.

выше установленных фоновых значений [26]. При этом указанный подход имел некоторые недостатки: 1) не учитывалось содержание ТМ на соседних станциях, которое по отдельным металлам могло быть как высоким, так и низким, 2) не учитывались станции, группы станций (районы), где содержание ТМ было ниже установленного уровня фона (97 перцентиль), но заметно выше их среднего содержания по Баренцеву морю. Для решения этих проблем на основе подхода, изложенного в методическом разделе, была выполнена комплексная картограмма распределения суммы нормированных содержаний ТМ в ДО Баренцева моря, представленная на рис. 2. На ней в виде дополнительной темы значками добавлены станции, где содержание исследованных металлов находится на уровне, превышающем фоновый. Это сделано для облегчения интерпретации полученных результатов, т.к. наш подход к выделению зон аккумуляции заключается в выявлении районов сочетания максимального по отдельным ТМ и высокого суммарного загрязнений. Величины фоновых уровней содержания ТМ в ДО Баренцева моря взяты из нашей публикации [26]. Они показаны первыми цифрами диапазона, приведенного в легенде. Для сведения, в табл. 1 приведено содержание ТМ в ДО некоторых отмеченных на рис. 2 зон депонирования.

Прозрачные поля на картограмме суммы на рис. 2 соответствуют акваториям, где содержание ни одного из ТМ не превышало своего среднего по морю значения. Как видно из картограммы, эта область невелика и располагается в основном в южной части моря, характеризующейся стабильно низким содержанием исследованных ТМ [26, 29]. Основное загрязнение ТМ оказалось сосредоточено в северо-западной и восточной частях Баренцева моря.

Из рис. 2 и анализа первичных данных следует, что загрязнение района Западно-Новоземельского желоба, района Шпицбергена, Центрального желоба и прибрежной зоны Западного Мурмана является комплексным. Подтвержден ранее сделанный вывод о том, что прибрежная зона Западного Мурмана загрязнена очень локально – только в пределах узкой прибрежной полосы [26, 28], поэтому ширина области аккумуляции загрязнения не превышает здесь нескольких морских миль.

Медианное значение полученных сумм содержания ТМ по фактическим данным без нулевых значений составило 4.71 ($n = 504$), а в интерполяционной модели среднее значение было 4.96. При делении суммы ТМ на количество фактически суммированных металлов для каждой станции

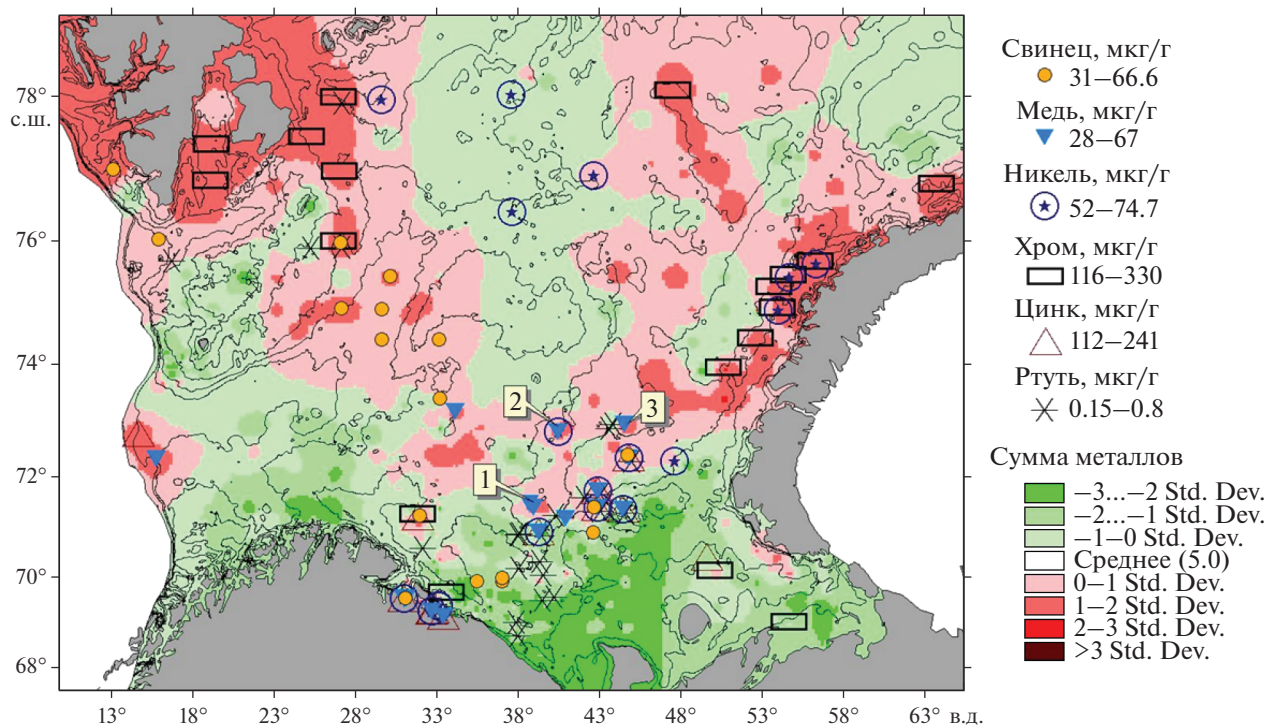


Рис. 3. Распределение стандартных отклонений (Std. Dev.) суммы содержаний ТМ в ДО Баренцева моря. Значками показаны станции с содержанием ТМ выше фоновых уровней. Условные обозначения см. текст.

значение варьировало от 1 до 6.6, в среднем для всех станций составив 1.48.

Представленная на рис. 2 карта имеет недостаток, заключающийся в том, что при выделении районов аккумуляции загрязнения применяется только один относительно строгий критерий — локализация станций с содержанием ТМ в ДО на уровне, превышающем фоновый (значки). Классификация расчетных данных на картограмме на 5 таксонов является в определенной мере произвольной. Применение метода равных интервалов не дает преимуществ. В то же время адекватный метод классификации данных необходим для уверенного выделения районов депонирования загрязнения.

Для получения более четкого критерия классификации данных по сумме ТМ выполнен следующий этап геостатистического анализа. В среде Arcview с использованием классификации данных методом стандартных отклонений (СО) вычислено и рекомендовано нами пограничное значение суммы ТМ на уровне — среднее арифметическое значение плюс одна сигма ($X_{cp} + 1\sigma$). Это значение оказалось равно 7.1. На картограмме, представленной на рис. 3, указанное значение, согласно легенде, отображено областями, раскрашенными темными красными тонами, соответствующими значениям СО (Std. Dev.) более 1. На этой картограмме, которая точнее отражает ситуацию с выделением границ областей депонирования ТМ, есть ряд отличий от картограммы на

Таблица 1. Среднее содержание ТМ в ДО отдельных районов аккумуляции, мкг/г сухой массы осадка

Район (зона)	Hg	Cu	Pb	Ni	Cr	Zn
Западно-Новоземельский желоб	0.032	<u>26.1</u>	<u>20.8</u>	<u>50.8</u>	121	<u>98</u>
Центральная впадина	0.30	32.1	11.7	67.7	31.9	<u>97.4</u>
Северо-восточный склон Шпицбергенской банки	0.173	<u>24.6</u>	31.9	<u>50.1</u>	130	<u>108</u>
Западный склон Мурманской банки	0.036	<u>16.6</u>	66.6	<u>36.2</u>	178	152
Зал. Вилькицкого и Норденшельда	0.024	<u>22.2</u>	<u>17.2</u>	53.1	118	<u>100</u>

Примечание. Подчеркнуты значения, превышающие средние по Баренцеву морю, жирным шрифтом выделены значения, превышающие также фоновые уровни (по [26]).

рис. 2. Главное из них – уменьшение площади потенциальных районов аккумуляции загрязнения за счет применения статистических процедур.

При значениях суммы ТМ на уровне более $X_{cp} + 1\delta$, т.е. больше величины 7.1, на рис. 3, так же как и на рис. 2, четко выделяется Западно-Новоземельский желоб, шельф Шпицбергена и, в меньшей степени, Центральный желоб. В последнем область аккумуляции ТМ представлена четырьмя фрагментами: в наиболее глубокой южной части (№ 1 на рис. 3) с суммой ТМ, достигающей 8.6; в западной глубоководной части с суммой ТМ 8.2 (№ 2 на рис. 3); в северо-восточной части желоба с максимальной суммой ТМ 9.0 (№ 3 на рис. 3) и группой участков на восточном склоне (см. № 4 на рис. 2) с наибольшими суммами ТМ 7.3–9.1 на глубинах 250–280 м. На всех участках преобладающие типы осадка – ил и песчаный ил.

Мнение о том, что Центральная впадина является одним из основных областей депонирования загрязнения, ранее высказывалось А.Г. Зинченко [5] и В.И. Гуревичем [3], но специальные исследования на этот счет ими не проводились. В других работах [17, 22] основная роль в аккумуляции осадочного материала в Баренцевом море отводилась краевым желобам, главным образом, Медвежинскому и Зюйдкапскому. Центральная впадина как внутренняя котловина в качестве существенной зоны аккумуляции в современный период не рассматривалась [22]. В то же время, ряд авторов считают, что основным поставщиком плотных донных вод в Центральную впадину является восточная периферия Центральной возвышенности, “омываемая” водами Северной ветви Нордкапского течения [1, 30]. На восточном склоне Центрального желоба наибольшее значение суммы ТМ составило 9.4. Упомянутый восточный склон – это относительно глубоководный район моря с сильным перепадом глубин – 200–290 м, дно которого покрыто преимущественно песчаным илом.

В Западно-Новоземельском желобе наибольшее значение суммы ТМ в ДО составило 9.5; немного восточнее в районе заливов Норденшельда и Вилькицкого, соответствующем предполагаемой области разгрузки ледников Вилькицкого (Северный и Южный) и Норденшельда – 8.7 (№ 5 на рис. 2). Важно, что для Западно-Новоземельского желоба показано наличие в толще воды придонного нефелоидного слоя и вдольсклоновых течений [31], которые могут быть ответственны за принос загрязненной взвеси в этот район. Ледники на островах, в частности, на Новой Земле являются дополнительными источниками осадочного материала в море путем переноса твердых частиц айсбергами и водотоками от тающих льдов [31, 40]. Влияние ледников хорошо

просматривается на карте (рис. 2) в отношении упомянутых ледников Вилькицкого и Норденшельда. К северо-востоку от зал. Вилькицкого расположена еще одна область, где, по-видимому, просматривается влияние тающих ледников, а именно: Иностранцева, Павлова, Визе, Веры и др. Это прибрежный район, примыкающий к зал. Иностранцева, (№ 6 на рис. 2) с максимальным отмеченным значением суммы ТМ в ДО 9.1. Есть данные, что за период 2001–2016 гг. площадь 11 ледников этого района сократилась на 56.8 км² [11].

Напомним, что выделение областей депонирования ТМ по показателю суммы их содержания в ДО следует комбинировать с данными по содержанию ТМ в ДО в количествах, превышающих фоновый уровень, как это показано на рис. 2, 3.

Еще одной областью депонирования загрязнения можно считать впадину Альбанова [5] с наибольшим значением суммы металлов 9.0. Во впадину Альбанова загрязнение вероятно попадает с Новоземельской банки в результате разгрузки льда, поступающего в этот район из Карского моря [10, 12, 13, 24] и с архипелагов. Подсчитано, в частности, что из Карского моря ежегодно может выноситься в северо-восточную часть Баренцева моря около 557 км³ льда [44]. Частые осенние штормы способствуют поддержанию высоких концентраций взвеси в воде Карского моря, а низкие температуры способствуют быстрой кристаллизации льда из переохлажденной воды [10]. Для Земли Франца-Иосифа и Новой Земли ледниковый сток по известным оценкам составляет 7 и 14.6 км³/год соответственно [12]. Кроме того, заприпайная полынья к югу от Земли Франца-Иосифа способна производить большое количество льда, существенно увеличивая соленость на шельфе, выжимая рассолы при льдообразовании [31]. Известно, что вклад ледового материала в ДО Арктики – более 50%, по другим определениям – более 70%. По всем основным показателям – это особый тип морского ледового седиментогенеза [13, 34].

Л. Midttun [41], подобно Ф. Нансену, считал Новоземельскую банку основным источником донных вод в Баренцевом море: с ее склонов плотные холодные воды стекают в прилегающие к ней желоба и впадины, в том числе Западно-Новоземельский, Центральный и Альбанова. На картограммах на рис. 2, 3 просматривается некоторая связь между Центральным и Западно-Новоземельским желобами, так сказать, область контакта между ними, на которой мы остановимся ниже. Аналогичный контакт виден и в отношении впадины Альбанова и Западно-Новоземельского желоба.

В районе Шпицбергена следует отдельно выделить северо-восточный склон Шпицбергенской банки, находящийся в зоне влияния течения

Баренца и Медвежинского течения (№ 1 на рис. 2). Здесь отмечено значение суммы ТМ в ДО 10.1 и комплексный характер загрязнения (Pb, Cr, Hg). Склон характеризуется выраженным перепадом глубин – 180–260 м, дно покрыто илом и песчаным илом. Важно, что Медвежинское течение, по оценке некоторых авторов, сплошное (от поверхности до дна) [14].

Наибольшее значение суммы содержания ТМ – 12.9 отмечено на станции, расположенной на западном склоне Мурманской банки (№ 2 на рис. 2), практически в открытом море. Следующая по уровню общего загрязнения ТМ станция, уже прибрежная, отмечена в Варангер-фьорде, вблизи устья губы Печенга – 12.2. Несколько ниже было значение суммы ТМ в прибрежной зоне Западного Мурмана в районе губы Долгой – 11.6. Эти три вышеприведенных участка считать зонами депонирования пока нет достаточных оснований, т.к. в последних двух случаях, по нашему мнению, имеет место локальное антропогенное загрязнение от местных источников [26, 28]. Случай высокого загрязнения западного склона Мурманской банки требует особого рассмотрения в дальнейшем, как представляющий интерес, вероятно, с позиций особенностей гидрологии данного района Баренцева моря.

Исходя из расположения приведенных областей депонирования загрязнения можно сделать вывод, что последнее поступает в эти области с разных направлений. Это предполагает расположение источников загрязнения металлами в различных, географически отдаленных друг от друга местах. Одним из таких источников, как было уже упомянуто, являются тающие в результате глобального потепления ледники и фирн на арктических архипелагах Земли Франца-Иосифа, Шпицбергена и Новой Земли, а также тающий в северо-восточной части Баренцева моря морской лед [12, 13, 31]. В Центральную впадину загрязнения может попадать с водами Нордкапского и Мурманского течений, а также в результате охлаждения воды и образования льда над мелководными районами Баренцева моря (Центральная и Новоземельская возвышенности). Косвенно в пользу первого пути свидетельствует наличие дополнительной области депонирования, расположенной в основании Медвежинского желоба на границе материкового склона, на входе в Баренцево море (на его западной границе). Этот район носит название верховья долины Персея. Это широкий подводный залив, вдающийся вглубь шельфа на 28–37 км (№ 3 на рис. 2). Ширина этого залива около 22 км. Здесь преобладают глубины 450–650 м. С севера в долину Персея вдается выступ материкового склона. На юго-западе возвышается обширная отмель Тромсефлакет. Такой рельеф, вероятно, делает этот район Баренцева моря седиментационной ловушкой для взвеси, переносимой в поверхностном слое (20–60 м) Нордкапского течения [14].

Непосредственно в верховье долины Персея в песчанистом иле отмечено содержание Cu, превышающее фоновый уровень. Несколько севернее в илистом песке отмечено высокое содержание Zn (см. рис. 2, 3). Однако приведенные данные по двум станциям – это все данные по этому району, которыми мы располагаем. Отсюда следует, для уверенного выделения района верховья долины Персея как области депонирования требуются дополнительные исследования.

Центральный желоб заполнен наиболее плотными по отношению к окружающим его районам водами. Отрицательная температура воды в Центральном желобе в нормальные и холодные годы наблюдается круглый год [30]. Такое состояние не способствует оседанию взвеси из поверхностных вод в придонные горизонты. Более вероятно, что взвесь приносится сюда придонными вдольсклоновыми (латеральными) потоками и в результате каскадинга с близлежащих возвышенностей и банок, в том числе, Гусиной и Северо-Канинской [2, 6, 7, 21]. При этом область вод и ДО с отрицательными температурами распространяется далеко за пределы Центрального желоба, включая склоны вышеупомянутых банок и Западно-Новоземельский желоб [16].

Представленные результаты исследований дают основания для уверенного выделения ряда упомянутых выше областей депонирования загрязнения в ДО Баренцева моря. Однако, необходимо учитывать, что загрязнение ТМ, они же элементы-примеси, не всегда просто идентифицировать, т.к. эти элементы постоянно присутствуют в морских отложениях в качестве регионального фона. Вклад техногенного загрязнения в этом случае требует специальной оценки. Этой проблематике мы посвятили отдельное исследование [26, 28]. Для дополнительной проверки обоснованности выделения нами зон депонирования загрязнения были привлечены данные по содержанию суммы ХОС в ДО Баренцева моря. Последние, по существу, являются маркерами антропогенного загрязнения. На основе методических подходов, примененных нами выше для расчета суммы металлов, была выполнена картограмма распределения суммарного загрязнения ХОС ДО Баренцева моря, представленная на рис. 4.

Подробные сведения об уровнях содержания ХОС в ДО Баренцева моря можно почерпнуть из нашей последней публикации [42].

На приведенной на рис. 4 картограмме, как и в случае ТМ, четко выделяются три основных депонирующих области – Западно-Новоземельский желоб, шельф Шпицбергена и Центральный желоб. Пограничное значение суммы ХОС для выделения областей депонирования по критерию

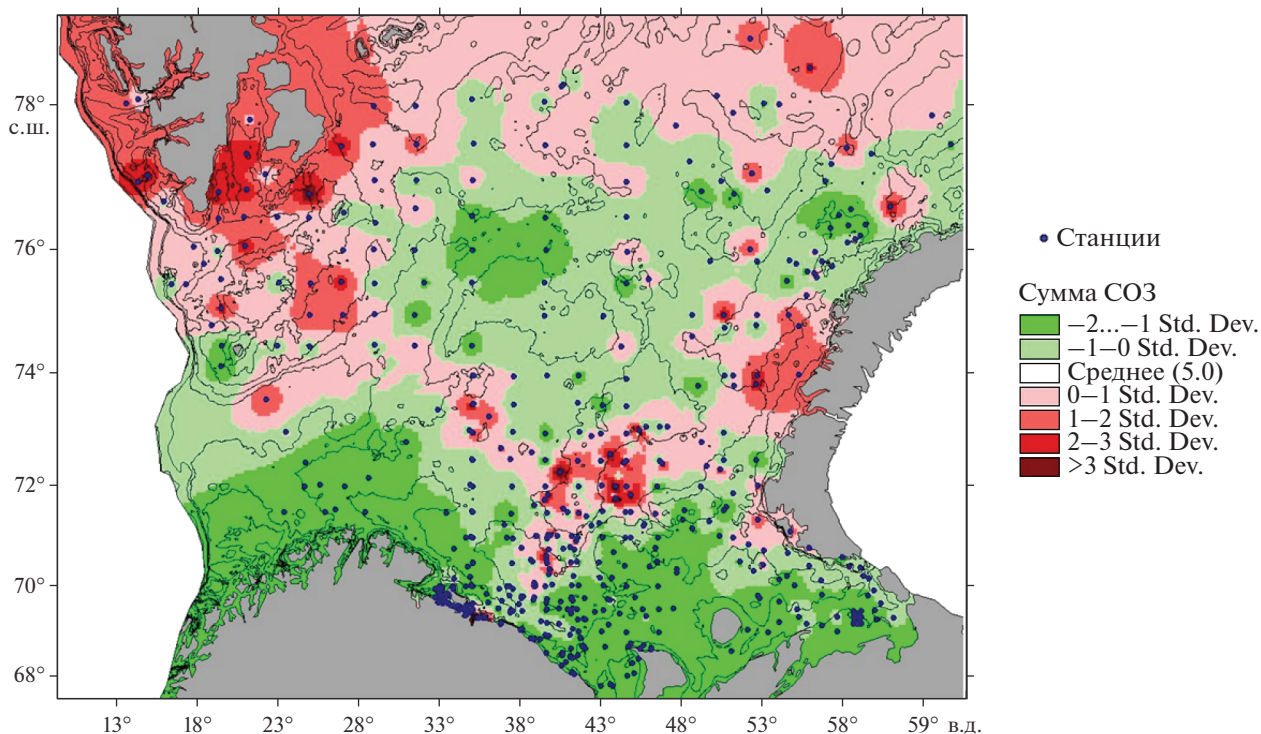


Рис. 4. Распределение стандартных отклонений (Std. Dev.) суммы содержаний ХОС в ДО Баренцева моря. Тонкие линии – изобаты.

$X_{cp} + 1\delta$, вычисленное средствами Arcview, составило 5.1.

Центральный желоб как область депонирования загрязнения в случае с ХОС выглядит убедительнее и занимает большую площадь, чем на рис. 2, 3. В средней части желоба отмечены значения суммы ХОС 16.5, что обусловлено комплексным загрязнением ГХБ и ГХЦГ. На западном склоне желоба значение суммы ХОС достигает 12.9, на восточном склоне – 15.2 и 17.5. Характер загрязнения тот же. Кроме того, следует отметить, что восточный склон желоба географически совпадает с областью дивергенции Мурманского течения на две ветви – Новоземельское и Колгуево-Печорское течения, разделенных Гусиной банкой. Аналогичное по составу загрязнение отмечено и на прилегающем к желобу с юга северо-восточном склоне Мурманской банки: максимальные значения суммы ХОС – 12.4 и 13.6.

В Западно-Новоземельском желобе загрязнение представлено в основном ДДТ с суммой ХОС в ДО до 7.9. Этот загрязненный участок характеризуется глубинами 175–185 м. Грунт – песчаный ил.

На шельфе Шпицбергена вблизи берегов островов Западный Шпицберген и Эдж суммы загрязнения ХОС варьируют в интервале 8.1–10.5. Среди ХОС здесь преобладают ГХБ и ПХБ. Этот район загрязнения представляет собой обшир-

ный участок дна со сложным рельефом, географически примыкающий к верховью Зюйдкапского желоба. Глубины здесь варьируют от 100 до 200 м, грунт в основном представлен песчаным илом. На северо-восточном склоне Шпицбергенской банки сумма ХОС достигает 7.9.

Отмеченный для суммы ТМ отдельный участок загрязнения на западном склоне Мурманской банки (№ 2 на рис. 2) в случае с ХОС не наблюдается. Последнее может свидетельствовать о том, что перенос ХОС с запада от берегов Северной Европы в Баренцево море практически не происходит. Загрязнение ХОС поступает преимущественно с севера, как высвобождающееся в результате таяния льдов ранее накопленное в Арктике загрязнение [42].

В качестве отдельной области депонирования загрязнения ХОС в Баренцевом море можно выделить район выхода из Кольского залива, представленный ДО самого Кольского залива, губы Ура и Кильдинского пролива. Суммы ХОС достигают здесь значений 16.4–21.0. Загрязнение здесь представлено в основном ДДТ и ПХБ. Вероятно, локальными источниками поступления ПХБ и ДДТ в ДО это района являются “кладбища” старых кораблей в губах и бухтах [9].

Как видно из рассмотренного материала, ДО выделенных нами районов аккумуляции загрязнения сложены исключительно тонкозернисты-

ми осадками, преимущественно илом или песчаным илом. Это представляется вполне закономерным, так как известно, что концентрации органических загрязняющих веществ коррелируют с содержанием тонкозернистой фракции ДО, чаще глинистой, сложенной более чем на 50% частицами размером менее 0.005 мм [45]. В отношении ТМ отмечена та же зависимость [3, 15].

Известно, что желоба представляют собой вероятные ловушки загрязненной взвеси. Появлению зон аккумуляции осадочного материала в желобах, включая загрязненные ДО, способствуют нисходящие гравитационные потоки с близлежащих мелководий [2, 6]. Д.С. Яшин [35] отмечал, что на изолированных возвышенностях дна преобладают процессы размыва и перебива ДО с выносом тонких фракций. Таким образом, ведущую роль в формировании потоков взвеси играют гравитационные течения, способные эродировать рыхлые отложения дна [21]. И.О. Мурдмаа и Е.В. Иванова [23], а также L. Oziel et al. [43] уверены в стекании тяжелых придонных вод во впадины Баренцева моря по поверхности окружающих их склонов банок и мелководий. Как мы уже отмечали выше, на рис. 2–4 видна связь между Центральным и Западно-Новоземельским желобами. По градиенту содержания ДДТ можно говорить о транспорте загрязнения из Новоземельского желоба в Центральный, а не наоборот. Этот поток направлен противоположно поверхностному Новоземельскому течению.

По мнению А.Г. Зинченко [6], Центральная впадина является крупной “ловушкой” внутришельфовой провинции Баренцева моря. Загрязнение поступает в эту область двумя путями: с нисходящими потоками с окружающих возвышенностей и с атлантическими водами, в том числе из удаленных районов [6]. Таким образом, фрагментарный характер зоны аккумуляции в Центральной впадине, рассмотренный нами на примере рис. 2 и 3, возможно, объясняется различиями в путях приноса основного загрязнения: на восточном склоне – циркуляционным потоком (атлантическое течение), а в котловине – вероятно, гравитационными потоками (каскадинг).

В отношении зоны депонирования загрязнения на шельфе Шпицбергена, очевидно, присутствуют два основных пути поступления загрязненной взвеси в ДО: в результате поверхностного стока с архипелага и северными проливами из Арктического бассейна. Маркером “привязки” зоны аккумуляции загрязнения к терригенному стоку с поверхности Шпицбергена может служить содержание Сг (см. рис. 2 и 3). Известно, что обширную аномальную зону содержания Сг и V в ДО шпицбергенского шельфа связывают с развитыми на его берегах изверженными породами основного состава [3]. Подобным образом область

высокого содержания Сг в ДО Западно-Новоземельского желоба, очевидно, может служить маркером влияния терригенного стока с о. Северный Новой Земли, на западной стороне которого также развиты выходы кристаллических пород, например, диабаз и гранита [3].

По мнению М.В. Митяева с соавторами [21], с севера взвешенное вещество с нефелоидными потоками поступает в Баренцево море из котловины Нансена через крайние желоба Франц-Виктории и Орла (Стурё), расположенные восточнее Шпицбергена. Судя по низким температурам и невысокой солености это арктические воды, которые характеризуются повышенными концентрациями взвеси. Наиболее высокие концентрации взвеси, до 2.2 мг/л, фиксируются над возвышенностью Персея, включая его седловину [21]. В этом случае загрязнения переносятся на юг течением Баренца и Медвежинским течением, причем концентрация взвеси в придонном слое наибольшая, что свидетельствует о наличии нефелоидного слоя. Основная масса взвеси в рассматриваемой зоне опускается в придонный слой достигая широты 76° с.ш. [21].

Версию о влиянии терригенного стока на формирование состава ДО прибрежной зоны Шпицбергена подтверждают данные о содержании ГХБ и ДДТ, как наши, так и других авторов [3, 4, 42]. По нашим данным, среднее содержание ГХБ в ДО шпицбергенского участка шельфа в зоне аккумуляции было выше среднего значения в остальной части Баренцева моря в 4 раза (0.77/0.19 нг/г сухой массы). В работе А.С. Демешкина [4], в частности, отмечено очень высокое содержание ДДТ в верхнем слое ДО залива Грен-фьорд (о. Западный Шпицберген) в период 2002–2013 гг. Наиболее часто повышенный уровень содержания ДДТ (до 32.5 нг/г) отмечался в прибрежной части залива – примерно в 30% отобранных проб ДО, в центральной части залива таких проб было 10%. Это намного выше наших данных по содержанию ДДТ в ДО района Шпицбергена. При этом пестициды ДДТ и ГХБ на Шпицбергене никогда не применялись, их присутствие на поверхности архипелага – результат дальнего атмосферного переноса [37].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения исследований выделены 3 основные области аккумуляции (депонирования) загрязнения на дне Баренцева моря, а именно: Западно-Новоземельский желоб, участок шельфа вокруг архипелага Шпицберген (южная часть) и Центральная впадина. Кроме того, описаны несколько локальных участков морского дна с признаками зон аккумуляции загрязнения, например, северо-восточный склон Шпицбергенской банки, впадина Альбанова, склоны Мурманской

банки, район разгрузки ледников у берегов о. Северный Новой Земли и др.

Выдвинуто предположение, что в Западно-Новоземельский желоб загрязнение поступает в основном с севера в результате переноса взвеси нисходящими придонными течениями с Новоземельской банки (каскадинга). В воды банки загрязнение, вероятно, поступает вследствие таяния дрейфующих льдов Арктики в северо-восточной части Баренцева моря и разгрузки ледников на близлежащих архипелагах в современный теплый период. Маркером этого пути переноса загрязнения может служить ДДТ, которое с западного, европейского направления в Баренцево море практически не поступает [42].

В ДО шпицбергенского шельфа вероятно накапливается загрязнение, приносимое сюда с севера холодным течением Баренца, известным еще как Восточно-Шпицбергенское, и придонными течениями того же направления по северным проливам, связывающим пролив Фрама с Баренцевым морем. К нему добавляется загрязнение, высвобождающееся из тающих ледников архипелага Шпицберген.

В Центральную впадину загрязнение приносится, с одной стороны, с запада Нордкапским течением и аккумулируется преимущественно на восточном ее склоне вследствие особенностей рельефа дна и гидродинамики района, с другой, стекающими сюда придонными водами со склонов Новоземельской банки и, возможно, из Новоземельского желоба.

Донные отложения — многокомпонентная сложная система, значительно влияющая на состояние водных биологических ресурсов, гидрохимический режим и нормальное функционирование экосистемы водоема. Решение проблемы выявления и картирования областей депонирования загрязнения на арктическом шельфе имеет важное прикладное значение в свете оценки экологической уязвимости морских акваторий [25]. Последняя является ключевым звеном при решении задач оценки качества среды обитания морских гидробионтов, в данном случае, бентосных беспозвоночных, а также донных рыб-бентофагов. Выявленные районы депонирования техногенного загрязнения не только представляют определенную потенциальную угрозу жизнедеятельности донных организмов, но и могут быть источниками вторичного загрязнения среды, например, при проведении гидротехнических, буровых и строительных работ на шельфе Баренцева моря. Уязвимость районов аккумуляции загрязнения обусловлена также угрозой дальнейшего накопления ТМ и ХОС в ДО вплоть до критических (токсичных) уровней. Эта угроза будет возрастать при ожидаемом увеличении техногенной нагрузки на шельф, например, при освоении

нефтегазовых месторождений или при авариях судов, перевозящих различные грузы по Северному морскому пути.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Адров М.М.* Как образуются холодные глубинные воды Центральной впадины Баренцева моря // Научно-технический бюллетень ПИНРО. 1958. № 2(6). С. 32–40.
2. *Айбулатов Н.А., Матюшенко В.А., Шевченко В.П. и др.* Новые данные о поперечной структуре латеральных потоков взвешенного вещества по периферии Баренцева моря // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 1999. № 6. С. 526–540.
3. *Гуревич В.И.* Современный седиментогенез и геоэкология Западно-Арктического шельфа Евразии. М.: Научный мир, 2002. 135 с.
4. *Демешкин А.С.* Геоэкологическая оценка состояния природной среды в районе расположения российского угледобывающего рудника Баренцбург на архипелаге Шпицберген. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб.: РГГМУ, 2015. 22 с.
5. *Зинченко А.Г.* Геоморфологическая основа комплексных ландшафтно-геоэкологических исследований Баренцева моря // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М.: Научный Мир, 2001. С. 476–481.
6. *Зинченко А.Г.* Экологическая геоморфология Арктического шельфа Евразии // Записки Горного института. 2008. Т. 176. С. 41–45.
7. *Иванов В.В.* Наблюдения каскадинга на шельфе и континентальном склоне Земли Франца-Иосифа // Вклад России в МПГ 2007/08. Океанография и морской лед. М.: Paulsen, 2011. С. 178–195.
8. *Кленкин А.А., Павленко Л.Ф., Корпакова И.Г., Студеникина Е.И.* Современная характеристика донных отложений Азовского моря по степени загрязненности комплексом наиболее опасных токсикантов // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 88–92.
9. Кольский залив: освоение и рациональное использование / Под ред. Г.Г. Матишова. М.: Наука, 2009. 381 с.
10. *Кодина Л.А., Люцарев С.В., Богачева М.П.* Изотопный состав органического углерода ледовой взвеси как показатель источника осадочного материала дрейфующего льда Арктики // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М.: Научный Мир, 2001. С. 244–255.
11. *Кучейко А.А., Макаренко А.С., Ильин Д., Саенко В.С.* Оценка динамики ледников национального парка “Русская Арктика” архипелага Новая Земля по спутниковым снимкам // Земля из космоса. 2017. № 8 (24). С. 73–78.
12. *Лисицын А.П.* Ледовая седиментация в Мировом океане. М: Наука, 1994. 448 с.
13. *Лисицын А.П.* Новый тип седиментогенеза в Арктике — ледовый морской, новый подход к исследованию процессов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 1. С. 18–60.

14. Лукашин В.Н., Шербинин А.Д. Исследование гидрологических особенностей взвеси и потоков осадочного вещества в толще воды Медвежинского желоба // *Океанология*. 2007. Т. 47. № 1. С. 78–89.
15. Лычагин М.Ю. Геохимия донных отложений дельты Волги // Каспийский плавучий университет. Научный бюллетень. 2001. № 2. С. 24–33.
16. Максимов В.М., Тупысев М.К., Пронюшкина С.М., Кульпин Л.Г. Некоторые проблемы экологической и промышленной безопасности природно-техногенных морских объектов при освоении шельфа Арктики // *Арктика: экология и экономика*. 2014. № 4 (16). С. 60–67.
17. Матишов Г.Г., Митяев М.В., Хасанкаев В.Б. и др. Современные области аккумуляции осадочного вещества в Медвежинском желобе Баренцева моря // *Докл. РАН*. 2002. Т. 384. № 6. С. 818–820.
18. Методика выполнения измерений массовой доли хлорорганических пестицидов в пробах почв и донных отложений методом хромато-масс-спектрометрии с изотопным разбавлением (М-МВИ-209-08). ФГУП “Всероссийский научно-исследовательский институт им. Д.И. Менделеева”, св. № 242/41-08 от 16.06.89.
19. Методика выполнения измерений массовой доли полихлорированных бифенилов в почве и донных отложениях методами газовой хроматографии и хромато-масс-спектрометрии (М-МВИ-09-97). НПО “Мониторинг”, НИИ гигиены, профпатологии и экологии человека МЗМП РФ, св. № 2420/463-97/0463 от 20.06.97.
20. 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 (М 02-902-125-2005). СПб.: ООО “АНАЛИТ”, № 242/120-2005. 25 с.
21. Митяев М.В., Герасимова М.В., Павлова Л.Г., Дружкова Е.И. Латеральные потоки взвешенного вещества на разрезе “Кольский меридиан” // *Труды КНЦ РАН*. 2018. Т. 9. № 4–5. С. 109–117.
22. Митяев М.В., Хасанкаев В.Б., Голубев В.А. Желоба Баренцева моря – современные каналы транспортировки или ловушки осадочного вещества? // *Арктика и Антарктика*. 2007. Выпуск 5(39). С. 72–79.
23. Мурдмаа И.О., Иванова Е.В. Последледниковая история осадконакопления в шельфовых впадинах Баренцева моря // *Литология и полезные ископаемые*. 1999. № 6. С. 576–595.
24. Немировская И.А. Углеводороды в океане (снег–лед–вода–взвесь–донные осадки). М.: Научный Мир, 2004. 328 с.
25. Новиков М.А. Интегрированная оценка эколого-рыбохозяйственной уязвимости морских акваторий: от теории к практике. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2013. 124 с.
26. 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.
27. Новиков М.А. Применение цифровой модели донных отложений Баренцева моря для анализа загрязнения // *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2018. № 3 (10). С. 205–209.
28. Новиков М.А., Жилин А.Ю. Характер распределения тяжелых металлов в донных отложениях Баренцева моря (по результатам статистического анализа) // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2016. Вып. 29. № 1. С. 78–88.
29. Новиков М.А., Титов О.В., Жилин А.Ю. Содержание металлов в донных отложениях центральной части Печорского моря в современный период // *Вестник МГТУ*. 2019. Т. 22. № 1. С. 188–198.
30. Ожигин В.К., Ившин В.А., Трофимов А.Г. и др. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. Мурманск: ПИНРО, 2016. 260 с.
31. Политова Н.В., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Лохов А.С. Рассеянное осадочное вещество Баренцева моря // *Океанология*. 2019. Т. 59. № 5. С. 777–790.
32. Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
33. 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: современное состояние и история развития*. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2009. С. 150–172.
34. Шевченко В.П., Маслов А.В., Штайн Р. Распределение ряда редких и рассеянных элементов в осадочном материале, переносимом дрейфующими льдами в районе плато Ермак, Северный Ледовитый океан // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 6. С. 949–959.
35. Яшин Д.С. Голоценовый седиментогенез арктических морей России // *Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона*. СПб.: Всерос. науч.-исслед. ин-т геологии и минеральных ресурсов Мирового океана, 2000. Вып. 3. С. 57–67.
36. AMAP Arctic Pollution 2009. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway, 2009. 83 p.
37. AMAP Assessment 2002: Persistent Organic Pollutants in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo, Norway, 2004. 310 p.
38. AMAP Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. AMAP. Oslo, Norway, 2015. 116 p.
39. AMAP Assessment 2016: Chemicals of Emerging Arctic Concern. AMAP. Oslo, Norway, 2017. 353 p.
40. Carr J.R., Bell H., Killick R., Holt T. Exceptional retreat of Novaya Zemlya’s marine-terminating outlet glaciers between 2000 and 2013 // *The Cryosphere*. 2017. V. 11. P. 2149–2174.
41. Midttun L. Formation of dense bottom water in the Barents Sea // *Deep-Sea Research*. 1985. V. 32. № 10. P. 1233–1241.
42. Novikov M.A. Persistent Organic Pollutants in Barents Sea Bottom Sediments // *Water Resources*. 2021. V. 48. № 3. P. 439–448.
43. Oziel L., Sirven J., Gascard J.-C. The Barents Sea frontal zones and water masses variability (1980–2011) // *Ocean Sci*. 2016. V.12. P. 169–184.

44. *Pavlov V.K., Pfirman S.* Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implication for pollutant distribution // *Deep-Sea Res. II.* 1995. V. 42. № 6. P. 1369–1390.
45. *Sander D.M., Holland A.F., Scott G.I.* Tidal creek and salt marsh sediment in South Carolina coastal estuaries. II. Distributoin of organic contaminants // *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 1999. V. 37. P. 458–471.
46. *Wania F.* Assessing the potential of persistent organic chemicals for long-range transport and accumulation in polar region // *Environ. Sci. Technol.* 2003. V. 37. P. 1344–1351.

Pollutants Accumulation Areas in Bottom Sediments of the Barents Sea

M. A. Novikov[#]

Polar Branch of “VNIRO” (“PINRO” named after N.M. Knipovich), Murmansk, Russia

[#]*e-mail: mnovik@pinro.ru*

Based on years-long research (2002–2018) conducted by PINRO, the issue of identification of pollutants accumulation areas in sediments of the Barents Sea was considered. GIS-technology and geostatistical analysis of data on the contents of heavy metals and organochlorine compounds were used in the research. Total sum of the rated values of contents for Cu, Ni, Pb, Zn, Cr, Hg, HCB and the sum of HCH, DDT and PCB in the sediments was used as a general rate of pollution and to identify concentration areas. The values were rated in accordance with the arithmetic mean value of each pollutant accumulation in the sediments. The mean value of the sum of the pollutants counted against the interpolation model was suggested as the criterion to identify technological pollution accumulation areas. The research resulted in singling out 3 major heavy metals pollution accumulation areas in the Barents Sea. It was concluded that pollution gets in an accumulation area in different ways. Glacial melting in arctic archipelagos entailed by global warming last two decades is likely to be one of the main pollutants.

Keywords: Barents Sea, bottom sediments, heavy metals, organochlorine compounds, accumulation areas