

УДК 551.468:550.42

ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ БАРЕНЦЕВА МОРЯ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА)

© 2016 Новиков М.А., Жилин А.Ю.

Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н.М. Книповича (ФГБНУ «ПИНРО»), Мурманск, 183038; e-mail: mnovik@pinro.ru

На большом объеме многолетних данных проанализирован уровень содержания тяжелых металлов в донных отложениях Баренцева моря. С использованием методов математической статистики и ГИС-технологий рассмотрена проблема фонового содержания тяжелых металлов в донных отложениях и вклад техногенной составляющей. Из всех исследованных металлов только для никеля и хрома отмечено заметное превышение имеющихся фоновых значений их содержания в донных осадках. Признаки техногенного загрязнения отмечены для свинца, кобальта и ртути. Фоновые показатели содержания никеля и хрома в донных осадках Баренцева моря нуждаются в уточнении.

Ключевые слова: Баренцево море, донные отложения, элементный состав, тяжелые металлы.

ВВЕДЕНИЕ

Баренцево море — это самое западное из морей Северного Ледовитого океана, омывающих берега России. Оно представляет собой сравнительно мелководный эпиконтинентальный водоем, благодаря особенностям рельефа дна которого осуществляется обширная связь с окружающими водоемами. Баренцево море свободно сообщается с Норвежским и Гренландским морями, менее свободно — с Центральным Арктическим бассейном и Карским морем и значительно хуже — с Белым морем. Ограниченное континентом только на юге и расположенное на североевропейской материковой отмели, Баренцево море относится к материковым окраинным морям (Виноградова, 1957; Добровольский, Залогин, 1982).

Акватория Баренцева моря занимает обширную область регионального Баренцевоморского мегапрогиба, проступающего от берегов Скандинавии до островов Новой Земли и Земли Франца-Иосифа (рис. 1). Осадочный покров, выполняющий Баренцевоморский мегапрогиб, сложен комплексом преимущественно терригенных пород общей мощностью до 18 км. В основании залегают метаморфические образования протерозоя (верхний рифей), которые со стратиграфическим несогласием перекрываются

осадочными толщами палеозоя (пермь), мезозоя и кайнозоя (Сорокин, 1987).

Среди голоценовых отложений Западно-Арктического шельфа господствующее положение (>80% по площади) занимают терригенные донные осадки, находящиеся в литодинамическом равновесии с придонным водным слоем. В составе донных осадков Баренцева моря моногранулярные осадки, содержащие более 75% песка, алевролита или пелита, в сумме занимают около 5% площади и фрагментарно распространены по акватории. Среди бигранулярных наиболее широкое развитие имеют алевроитовые: песчаный алевроит — 10%, алевроитовый песок — 12%, алевроитовый пелит — 13%, пелитовый алевроит — 51% площади дна (Гуревич, 2002). Значительные участки дна, особенно в центральной части моря и севернее 73° с.ш., заняты илом (дно Центрального и Западно-Новоземельского желобов, желоба Персея) (рис. 1). Наличие здесь системы замкнутых впадин способствует образованию затишных зон и отложению илистого материала. Отложения песка преобладают в юго-восточной части моря и на Шпицбергенской банке (Гуревич, 2002).

Баренцевоморская провинция является важным нефтегазоносным бассейном. На шельфе Баренцева моря открыто 11 месторождений, в том числе 4 нефтяных (Приразломное,

ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

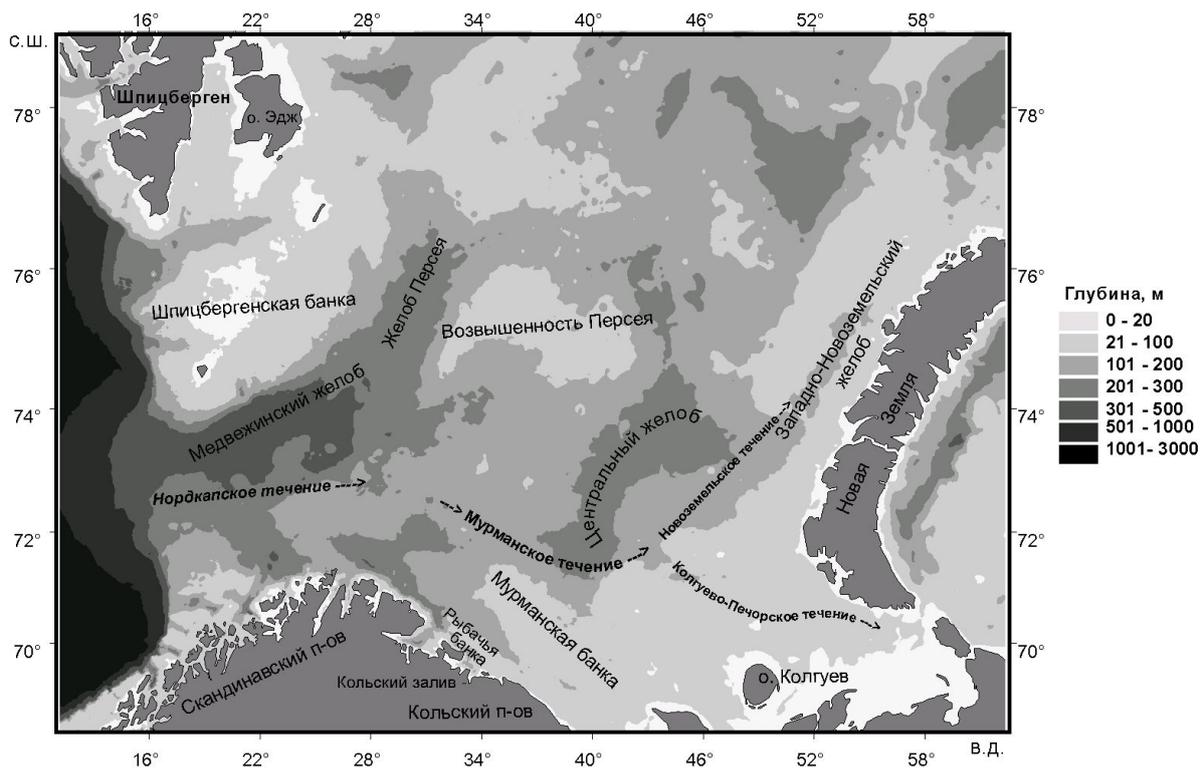


Рис. 1. Карта района исследований.

Долгинское, Варандейское, Медыньское), 3 газовых (Мурманское, Лудловское, Северо-Кильдинское), 3 газоконденсатных (Штокмановское, Поморское, Ледовое) и 1 нефтегазоконденсатное (Северо-Гуляевское) (Мнацаканян и др., 2002). На текущий момент разрабатывается только Приразломное нефтяное месторождение в юго-восточной части моря. Добыча нефти на нем начата в 2014 г. Всего за первый год промышленной разработки суммарно было добыто и отгружено около 2.2 млн баррелей нефти (300 тыс. тонн) (Минэнерго ..., 2015). Никаких происшествий на данном месторождении, связанных с загрязнением воды, донных отложений и биоты согласно мониторинговым исследованиям, выполняемым ФГБНУ «ПИНРО», к настоящему времени не отмечалось.

Основными источниками поступления загрязняющих веществ в Баренцево море являются: терригенный (речной) сток, трансграничный атмосферный перенос, поступление из Западной Европы с водами Нордкапского течения, перенос дрейфующими льдами и другое. По некоторым данным (Шевченко, 2006) вклад аэрозолей, переносимых атмосферными потоками в осадконакопление Северного Ледовитого океана, составляет около 10 %. Балансные расчеты показывают, что вклад аэрозолей в формирование осадочного материала в Арктике близок к вкладу речного взвешенного вещества за пределами маргинальных фильтров рек (Шевченко и др., 2006).

В научной литературе исторически сложилось представление о ведущей роли Северо-Атлантического течения в переносе загрязняющих веществ из Западной Европы в Баренцево море. Установлена тенденция снижения их концентраций в направлении с запада на восток, где они, как правило, не превышают фоновых уровней (Ильин и др., 2011; Матишов и др., 1997). Так, в западной части Баренцева моря в 2006–2007 гг. были выявлены высокие концентрации в воде (мкг/л) кадмия — 29.64, свинца — 20.36, цинка — 81.55 и меди 28.59. Превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) в морской воде по указанным металлам составляло от 1.5 до 6 раз. При движении на восток указанные концентрации быстро снижались (Корнеев и др., 2008). Однако, как показал наш анализ больших массивов данных, такая тенденция не носит общего характера. Более того, общий анализ уровней присутствия микроэлементов в морской воде свидетельствует о том, что по основным видам загрязняющих веществ Баренцево море значительно чище других европейских морей (Жилин, Плотицына, 2013; Плотицына, Жилин, 2011).

Наибольшее влияние на гидродинамический режим моря оказывают атлантические воды, мощным потоком поступающие с запада. Встречаясь с холодными водами Арктического бассейна, эти воды образуют обширную зону смешения, так называемый Полярный фронт. Определяющим фактором формирования

гидрологического режима является водообмен на западной границе бассейна, где результирующий перенос постоянно направлен из Норвежского моря, что приводит к поступлению больших объемов атлантических вод. В среднем они составляют от 49 до 74 тыс. км³/год (Гидрометеорология ..., 1990). В Баренцевом море, по сравнению с большинством других арктических морей России, величина речного стока относительно невелика — порядка 215 км³/год. При этом суммарный вынос растворенного вещества водотоками Мурманского побережья составляет не более 1.0 млн т в год. По величине золотого потока взвешенного органического вещества на поверхность водоема Баренцево море в лидерах среди морей российской Арктики — 363 тыс. т/год (Леин, 2014; Митяев, 2014).

Динамичные, постоянно обновляющиеся поверхностные воды Баренцева моря не могут служить надежным критерием для уверенного отслеживания тенденций техногенного загрязнения окружающей среды региона. Внешнее загрязнение поступает в воду, как правило, неравномерно, там оно разбавляется, переносится, осаждается, вступает в физико-химические реакции, взаимодействует с компонентами водных экосистем. Значительная часть поступившего в морскую воду загрязнения адсорбируется на взвешенных частицах (сестон), захватывается, фильтруется и усваивается планктоном. В итоге загрязняющие компоненты, включенные в твердое вещество, оседают и депонируются в донных отложениях, или осадках (ДО). Этот процесс происходит медленно и непрерывно. Таким образом, донные отложения являются надежным индикатором накопления загрязнения или динамики естественного фона, характеристики которого с годами изменяются незначительно, что позволяет проследить тенденции этого процесса.

Основная задача настоящего исследования — оценить является ли присутствие ряда тяжелых металлов (ТМ) в ДО следствием техногенного загрязнения, или наблюдаемое их содержание характеризует естественный геохимический фон.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Материалом для исследований служили пробы поверхностного слоя ДО, отобранные сотрудниками ПИНРО в морских экспедициях по исследованию состояния морских биологических ресурсов и среды их обитания. Отбирался поверхностных слой осадка с использованием дночерпателя Ван Вина. Всего в период с 1998 по 2015 г. включительно было выполнено от 213 до 562 станций для каждого металла. Уровни

содержания металлов в донных отложениях Баренцева моря определялись в аккредитованной лаборатории прикладной экологии и токсикологии ФГБНУ «ПИНРО» методом атомно-абсорбционной спектроскопии в соответствии с методическим руководством (Методика ..., 2005). Анализировали содержание в ДО меди, никеля, цинка, свинца, кобальта, хрома и ртути. Полученные значения содержания ТМ выражали в мкг/г сухой массы осадка.

В целях пространственного анализа данных выполняли комплексную карту-схему распределения максимальных уровней (верхний диапазон значений) содержания металлов в ДО Баренцева моря. Под максимальными понимали уровни содержания ТМ, превышающие фоновые показатели. В качестве региональных фоновых значений применяли шкалу, предложенную Норвежским государственным агентством по контролю загрязнения окружающей среды для прибрежной зоны Норвежского моря (Statens forurensningstilyn, SFT) (Bakke et al., 2007). Выбор фоновых значений норвежскими исследователями основывался на значениях содержания металлов в «доиндустриальных» слоях пробы ДО.

Картографирование выполнялось в среде ГИС-приложения Arcview 3.2 с применением специального подхода. При оформлении конечной карты все данные, кроме группы значений, превышающих фоновые показатели, отбрасывали. Указанный подход использовался нами, с одной стороны, для одновременного отображения данных по всем ТМ на карте, а с другой — для удаления лишней, несущественной информации. В качестве базовой карты-подложки использована батиметрическая карта Баренцева моря, выполненная на основе собственных данных ПИНРО.

Статистический анализ полученных данных выполняли в среде пакета прикладной статистики Statistica 10. В частности, был выполнен корреляционный анализ — оценка связи содержания меди, цинка, никеля, хрома, свинца и кобальта в ДО Баренцева моря по данным за период с 2009 по 2015 г. включительно. Рассчитывали непараметрический коэффициент корреляции Спирмена (r_s), т.к. распределение содержания большинства изученных металлов в ДО Баренцева моря было отлично от нормального.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлена комплексная карта-схема распределения содержания исследованных ТМ в ДО по данным морских экспедиций ПИНРО в 1998–2015 гг. Показанные на карте значения отражают относительно высокие уровни

ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

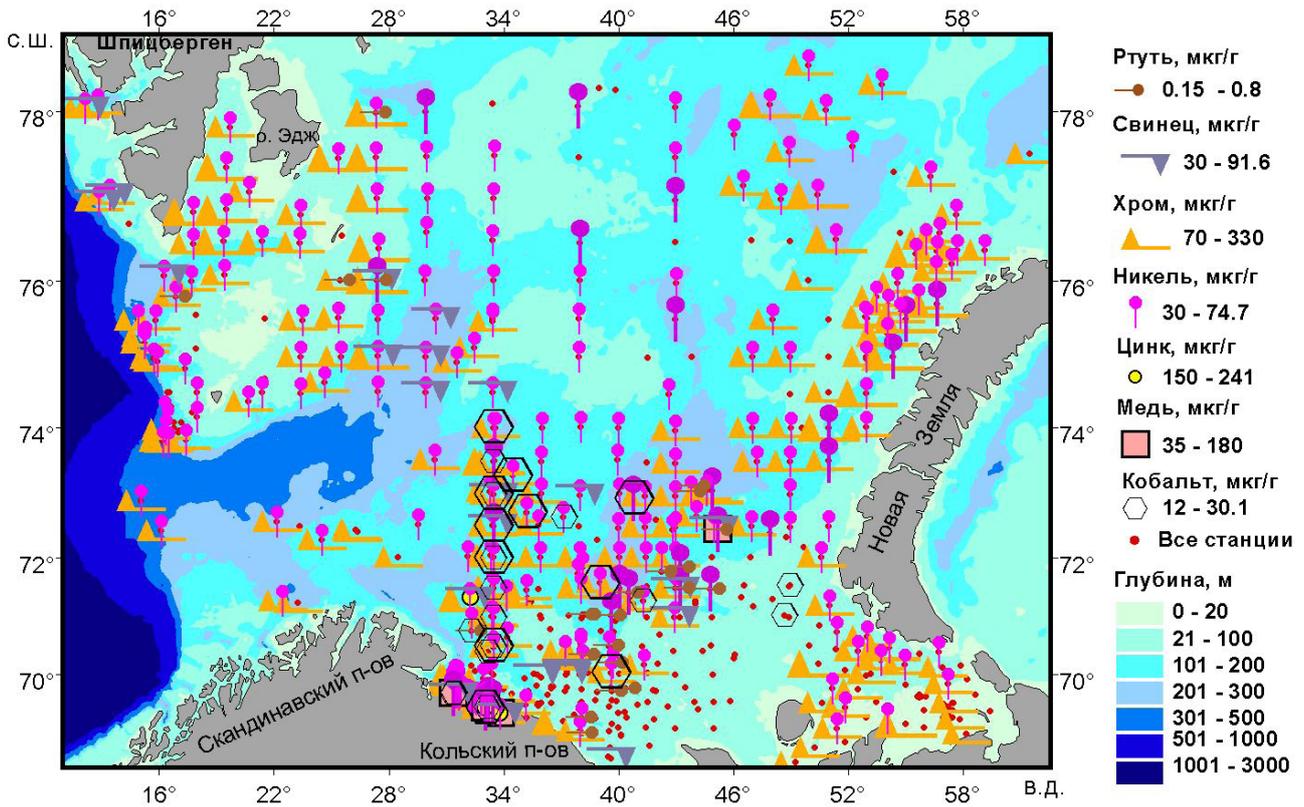


Рис. 2. Уровни содержания различных тяжелых металлов в донных отложениях Баренцева моря, превышающие фон. Укрупненными значками показаны контрастные аномалии для Ni, Cr и Co (пояснения в тексте).

содержания металлов, присутствие которых в морской среде обычно связывают с влиянием техногенного фактора, то есть с загрязнением.

Содержание относительно высоких количеств хрома и никеля в ДО достаточно равномерно распределено по всей акватории Баренцева моря (рис. 2). Повышенное количество ТМ отмечено в ДО склонов Медвежинской банки на западной границе моря, в ДО районов Медвежинского и Центрального желобов, Рыбачей и Кильдинской банок, прибрежных районов юго-западной части моря, Северного склона Мурманской банки и района Западно-Новоземельского желоба (рис. 1).

Кроме повышенных относительно фона значений, следует еще обратить внимание и на распределение величин контрастных аномалий, показанных на карте (рис. 2) укрупненными значками для Ni, Cr и Co. Контрастные аномалии представлены значениями на уровне 95 % квантилей накопленных частот. Величины этих аномалий для Ni, Cr и Co составляют 49.1, 112.0 и 17.8 мкг/г соответственно. В случае Cu, Zn, Pb и Hg вычисленные нами значения контрастных аномалий были меньше или равны принятым фоновым значениям, поэтому все приведенные на карте значки отражают также и контрастные аномалии. Высокие уровни содержания (включая большинство аномалий) Cu, Ni, Zn и Pb

наблюдаются в ДО узкой прибрежной полосы, лежащей к западу от выхода из Кольского залива до Варангер-фьорда, так называемого Западного Мурмана. Вычисленные средние значения содержания перечисленных металлов для указанного географического района ($n = 20$) превышали таковые для остальной акватории моря в 1.78, 1.15, 1.21 и 1.73 раза соответственно. Это свидетельствует в пользу техногенного загрязнения Cu, Ni, Zn и Pb ДО прибрежной части моря, поступающего с материковым стоком с северо-западной части Кольского п-ова. Обращает на себя внимание относительно малое содержание Pb в осадках на значительной площади юго-западной и юго-восточной частей Баренцева моря, а Cu и Zn практически на всей акватории моря.

Принято считать (Ильин и др., 2011; Матишов и др., 1997), что имеющее место загрязнение юго-западной части Баренцева моря тяжелыми металлами связано с деятельностью предприятий Кольской горно-металлургической компании (АО «Кольская ГМК»), расположенных на территории Мурманской области вблизи населенных пунктов Заполярный, Никель и Мончегорск (западная часть Кольского п-ова). В атмосферных выбросах комбинатов «Печенганикель» и «Североникель» среди металлов преобладают Ni, Cu и Co, являющиеся основными продуктами их производства. Мы выполнили ряд

статистических процедур, чтобы проанализировать сложившуюся ситуацию с присутствием некоторых ТМ в ДО в последние семь лет.

Статистический анализ выявил высокий уровень корреляции содержания металлов в парах: Cu и Zn ($r_s = 0.88$, здесь и далее при $n = 179$ и $p < 0.05$), Cu и Ni ($r_s = 0.91$), Cu и Cr ($r_s = 0.83$), Ni и Zn ($r_s = 0.87$), Ni и Cr ($r_s = 0.79$), Zn и Cr ($r_s = 0.79$). Средние уровни корреляции обнаружены в парах: Cu-Co ($r_s = 0.63$), Ni-Co ($r_s = 0.62$), Cr-Co ($r_s = 0.69$), Pb-Co ($r_s = 0.59$) и Zn-Co ($r_s = 0.50$). Выявленная высокая корреляция по критерию Спирмена говорит о существовании сильной связи между приведенными парами ТМ в ДО, где $r_s > 0.7$, при этом коэффициент детерминации был $> 50\%$, то есть один признак определяет другой более, чем наполовину (Благовещенский и др., 1985). Представленные выше высокие уровни корреляции содержания ряда металлов в ДО могут породить сомнения в том, а не проявляется ли здесь эффект так называемой ложной корреляции? Причиной ложной корреляции может быть общая тенденция (тренд) нарастания уровней содержания металлов в осадках вследствие процессов накопления загрязнения. Мы проверили это сомнение путем выполнения совмещенного с диаграммой графика трендов содержания основных ТМ в донных осадках Баренцева моря в период с 2009 по 2015 г. (рис. 3). Значимой

тенденции накопления загрязнения металлами в ДО Баренцева моря в последние семь лет не наблюдается. Коэффициенты детерминации при переменных весьма малы. Таким образом, линейный тренд описывает незначительную часть дисперсии исходного ряда данных, и вкладом ложной корреляции во всех случаях можно пренебречь.

В случае заметного влияния выбросов упомянутых металлургических комбинатов на химический состав ДО Баренцева моря следовало бы ожидать сильную связь в паре Cu-Ni и отсутствие таких связей этой пары с другим изученными металлами (кроме Co). Однако наблюдается сильная зависимость не только в этой паре, но также Cu и Ni с Zn и Cr. Особняком стоят Pb и Hg. Известно, что цинк — это элемент глобального распространения. Существующее техногенное поступление Zn в окружающую среду на 700% превышает природное, причем производство и использование цветных металлов дает до 43% общего техногенного выброса цинка в атмосферу (Мур, Рамамурти, 1987). Важным источником Zn является также сжигание древесины и отходов деревообрабатывающей промышленности. Вместе с тем, Zn, как Cr, не являются продуктами производства металлургических комбинатов «Североникель» и «Печенганикель». Представленные результаты

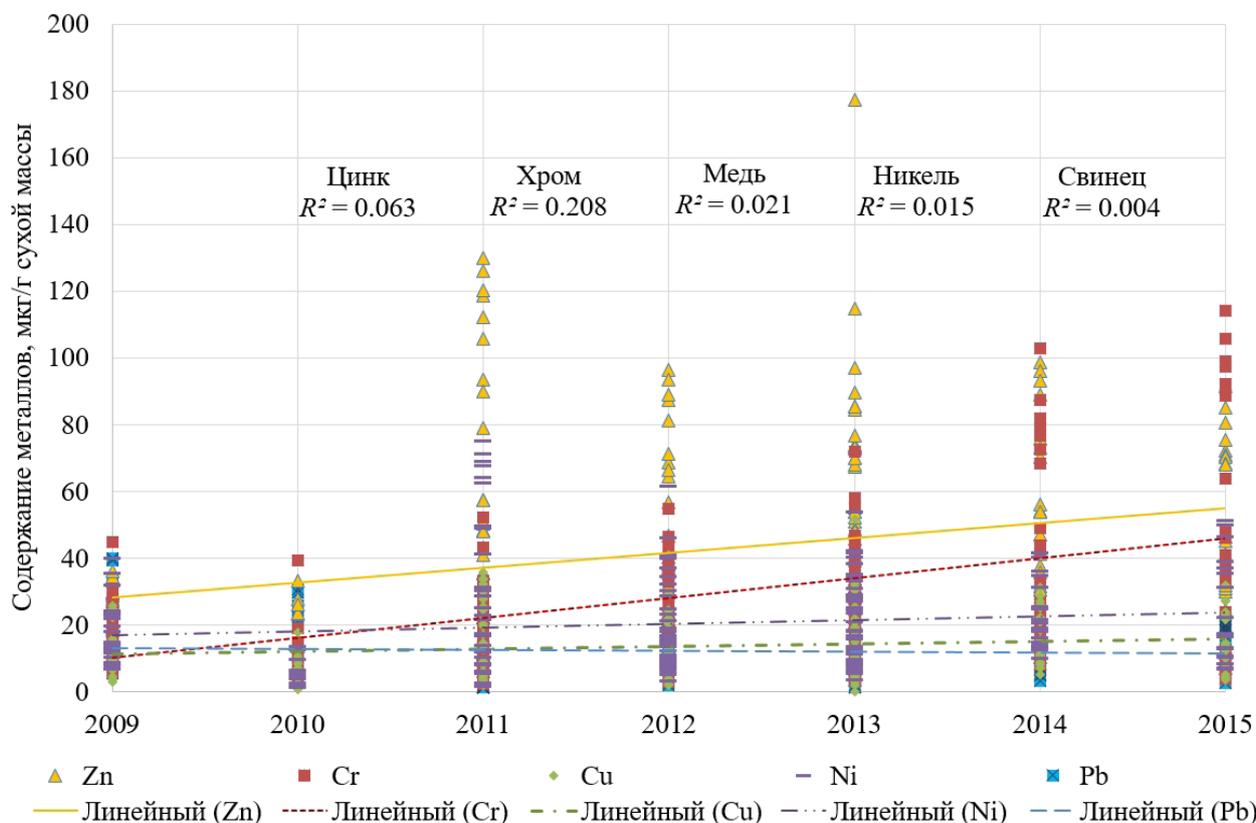


Рис. 3. Динамика содержания ряда металлов в ДО Баренцева моря с 2009 г. по 2015 г. с нанесенными на диаграмму линиями тренда. Приведены коэффициенты детерминации (линейной регрессии) для каждого металла.

корреляционного анализа свидетельствуют в пользу предположения о том, что в регионе Баренцева моря формирование фона ТМ в ДО происходит комплексно, то есть совместно на основе природных особенностей региона. Исключение составляет вышеупомянутая узкая прибрежная полоса Западного Мурмана, на состав ДО которой негативно влияет материковый сток, загрязненный сточными водами г. Заполярного и пгт. Никеля, а также в результате атмосферных выбросов с предприятий горно-обогатительного комбината «Печенганикель».

С помощью метода аппроксимации — построения линий тренда или регрессии в среде программного приложения *MSExcel 2013* мы попытались оценить характер связи между вышеупомянутыми металлами. Наилучший результат был получен в отношении пары Cu-Zn при использовании функции полинома второй степени (уравнения параболы). Коэффициент детерминации R^2 (рис. 4) в данном случае равнялся 0.81 (в случае линейной регрессии $R^2 = 0.77$). Отмечена также весьма достоверная аппроксимация в паре Ni-Zn по линейному уравнению: $y = 1.8207x + 5.117$, при $R^2 = 0.79$.

Аналогичные результаты получены и в отношении пары Cu-Ni, но с меньшим значением коэффициента детерминации (рис. 5). Причем этот коэффициент был максимален и практически одинаков как в случае линейной регрессии, так и при использовании полинома.

Таким образом, в ДО Баренцева моря имеет место высокий уровень связи между Cu и Ni.

Однако этот уровень связи установлен для всей акватории Баренцева моря, где выполнялись съемки ПИНРО в период с 2009 по 2015 г. А это весьма обширная площадь, включающая районы, удаленные на сотни километров от побережья Кольского п-ова. Отдельно при использовании данных за 2015 г., характеризующих только южную часть Баренцева моря, коэффициент корреляции между содержанием Cu и Ni в ДО составлял 0.88, коэффициент детерминации линейной регрессии 0.78 ($n = 21$). Что в принципе совпадает с морем в целом.

Отношение содержания меди и никеля в ДО (Cu/Ni) в пробах, по нашим данным за период с 2009 по 2015 г., в среднем составляет 0.83. Согласно имеющимся данным в атмосферных выбросах упомянутых металлургических комбинатов Кольской ГМК указанное соотношение в период 2002–2009 гг. составляло порядка 1.1–1.3 (Червякова, 2014). В покровных образованиях нагорных плато Кольского п-ова это соотношение варьирует от 3 до 1 (Добровольский, 1983). Существует ряд данных, из которых следует, что атмосферные выпадения на территории Кольского п-ова и его побережья содержат медь и никель в соотношении примерно 2–4 к 1 (Биология ..., 2007; Голубева и др., 2005). Среднее отношение концентраций Cu/Ni в пробах воды Баренцева моря, по нашим данным, составляет 1.80. На основании вышеприведенного можно утверждать, что ДО Баренцева моря обогащены никелем относительно состава терригенного материала.

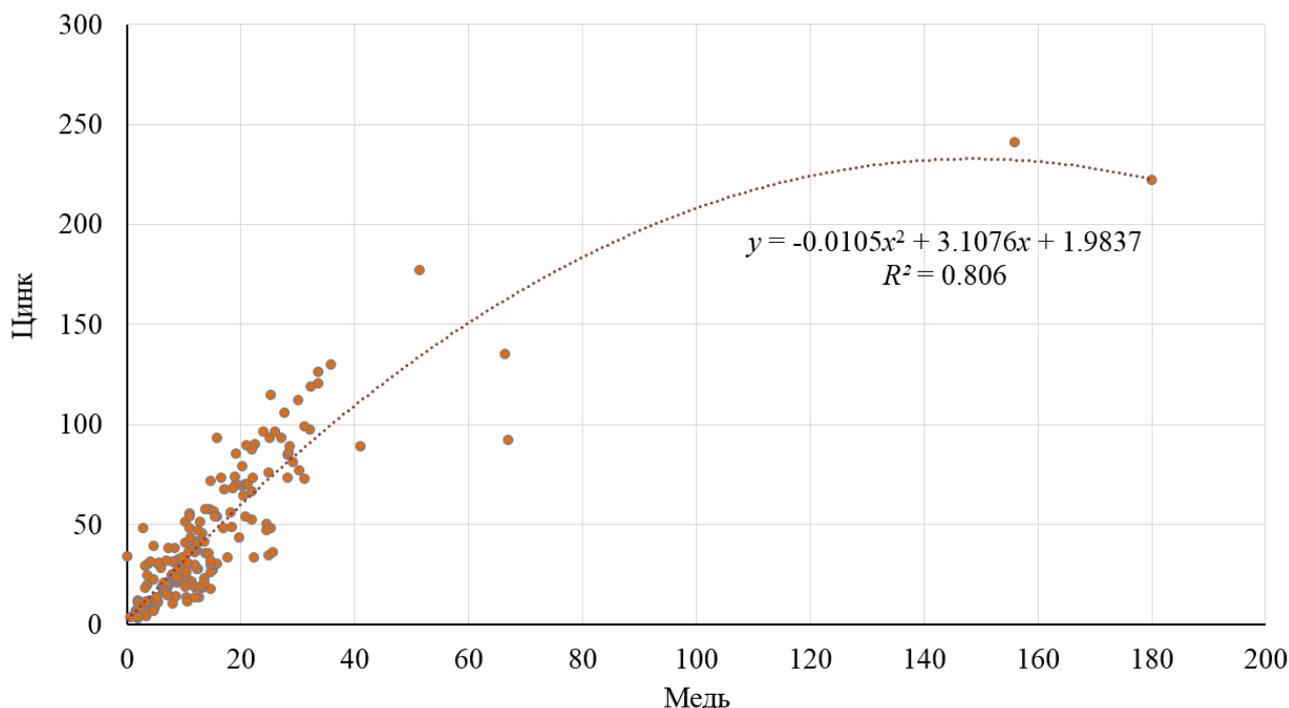


Рис. 4. Связь между содержанием меди и цинка в донных отложениях Баренцева моря (по данным за 2009–2015 гг.), мкг/г сухой массы.

В то время как соединения цинка практически не присутствуют в выбросах предприятий Кольской ГМК, кобальт наряду с медью и никелем один из основных продуктов их производства. При среднем уровне корреляции содержания в ДО удовлетворительной аппроксимации между медью и кобальтом не отмечено. Коэффициент детерминации не превышал 0.33. На таком же уровне описывалась связь между никелем и кобальтом.

Соотношение Cu/Co в покровных образованиях нагорных плато Кольского п-ова относительно стабильно и составляет 3.0–3.3 (Добровольский, 1983). В ДО Баренцева моря это соотношение равно 5.5, а значит ДО моря обеднены кобальтом относительно терригенного материала.

Таким образом, современный уровень содержания меди, никеля и кобальта в ДО на основной акватории Баренцева моря не связан с загрязнением в результате деятельности промышленных предприятий, расположенных на Кольском п-ове.

Данное предположение, в частности, подтверждается исследованиями Института промышленной экологии Севера КНЦ РАН. Так, В.А. Даувальтером с соавторами (2012) показано, что уровень загрязнения донных отложений озер Кольского п-ова металлами (Ni, Cu и Co) снижается фактически до фоновых значений по мере их удаленности от источников загрязнения — металлургических комбинатов на 30–40 км. Напомним, что г. Заполярный и пгт. Никель, где

расположены предприятия комбината «Печенганикель», расположены на расстоянии 40 км и более от береговой линии Баренцева моря, а г. Мончегорск комбинатом «Североникель» — примерно в 160 км.

Статистический анализ цифровых данных карты (рис. 2), показал, что среди металлов наиболее «тревожным» оказывается распределение в ДО Баренцева моря никеля. На 52.1% исследованных с 1998 г. станций отмечены значения его содержания выше принятого регионального фоновый уровня — 30 мкг/г. Поскольку содержание Ni в ДО распределено по нормальному закону, имеет смысл привести среднее значение за период 1998–2015 гг. и величину стандартного отклонения (CO) 29.43 ± 14.15 мкг/г. Достаточно широко в осадках Баренцева моря распространены также превышающие фоновые уровни содержания хрома — 35.0% всех станций. Содержание кобальта превышало фоновое значение на 12.2% станций. Единично отмечены высокие значения уровней содержания в ДО меди и цинка — по 1.2% всех станций и в незначительном количестве ртути — 4.8% и свинца — 4.4%. Повышенное содержание кобальта и свинца по линии гидрологического разреза «Кольский меридиан» ($33^\circ 30'$ в.д.) свидетельствует в пользу поступления загрязнения этими металлами с запада с водами Нордкапского течения (рис. 1, 2). Кроме того, выше при анализе корреляций мы отметили, что свинец, кроме как с кобальтом, заметных корреляций с другими исследованными металлами не имел.

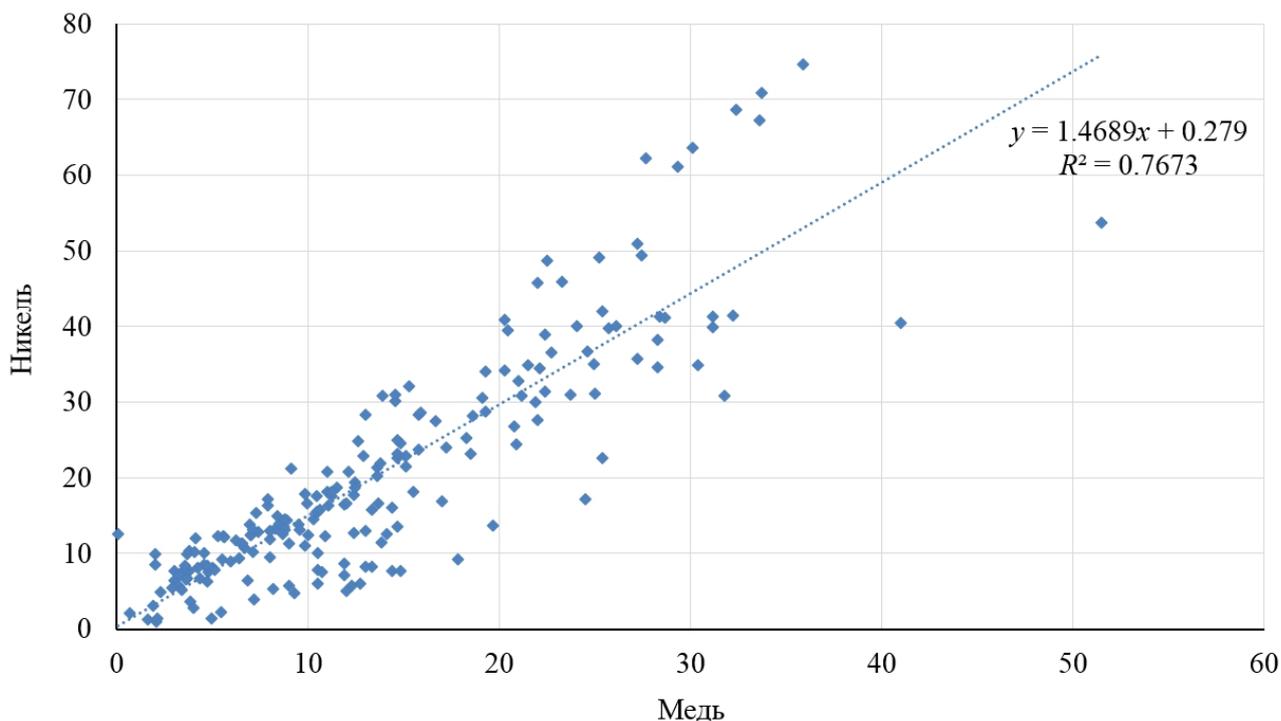


Рис. 5. Связь уровней содержания соединений меди и никеля в ДО Баренцева моря, мкг/г сухой массы (по результатам съемок 2009–2015 гг.).

Присутствие повышенных содержаний ртути в ДО в центре южной части Баренцева моря и в северо-западном его районе также следует приписывать техногенному загрязнению. Ртуть не коррелировала ни с одним из металлов, а значит источник ее поступления специфичен.

Известно, что при выявлении техногенной компоненты на фоне естественных концентраций важная роль отводится сопоставлению содержания металлов в верхнем, современном слое ДО и в подстилающих более старых отложениях. Так для большинства ТМ в ДО Баренцева моря В.И. Гуревичем (2002) не было отмечено существенных различий в распределении по колонкам. Исключение составляли Hg и Pb. Одна отмеченная локальная аномалия по Hg имела место в Центральной впадине (желобе), а другая в Кольском заливе (Гуревич, 2002). По нашим данным, в районе Центрального желоба, в частности, также наблюдается зона повышенного содержания Hg.

Нормальное распределение содержания Ni в ДО, а также его высокая корреляция с Cu и Zn очевидно свидетельствуют об отсутствии техногенного загрязнения ДО Баренцева никелем, как, впрочем, и Cr. Хотя распределение хрома в ДО отлично от нормального (среднее значение и CO 53.69 ± 35.76 мкг/г), характер его распределения по акватории Баренцева моря (рис. 2) и та же самая корреляция с медью и цинком не дают оснований для выделения участков антропогенного загрязнения.

Весьма примечательным является обнаруженное нами сходство средних значений содержания меди, никеля, свинца и хрома в ДО Баренцева и Восточно-Сибирского морей. Для Баренцева моря они составляли 16,0, 29,43, 17,48 и 53,6 мкг/г соответственно, а для Восточно-Сибирского — 18,7, 33,2, 16,92 и 69,81 мкг/г соответственно (Шакиров и др., 2013). В результате статистического анализа данных таблицы, приведенных в указанном источнике по Восточно-Сибирскому морю, нами получен весьма высокий уровень корреляции между содержанием Cu, Ni, Zn, Pb, Cr и Co в ДО этого моря во всех сочетаниях. Гидрологический режим Баренцева и Восточно-Сибирского морей весьма отличен друг от друга (Добровольский, Залогин, 1982). В последнем резко доминирует приток вод из Центрального Арктического бассейна. Объединяет эти моря следующее: преобладание литогенного (кластического) материала в процессе формирования ДО и, вероятно, вклад биогенной составляющей. Преобладающий тип осадков на исследованном профиле Восточно-Сибирского моря — алеврит пелитовый с включением алеврита псаммитового (Шакиров и др., 2013), соответствует преобладающему типу осадков Баренцева моря.

Таким образом, вопрос, требующий отдельного рассмотрения, — влияние содержания органического вещества на аккумуляцию загрязнения или повышение содержания микроэлементов.

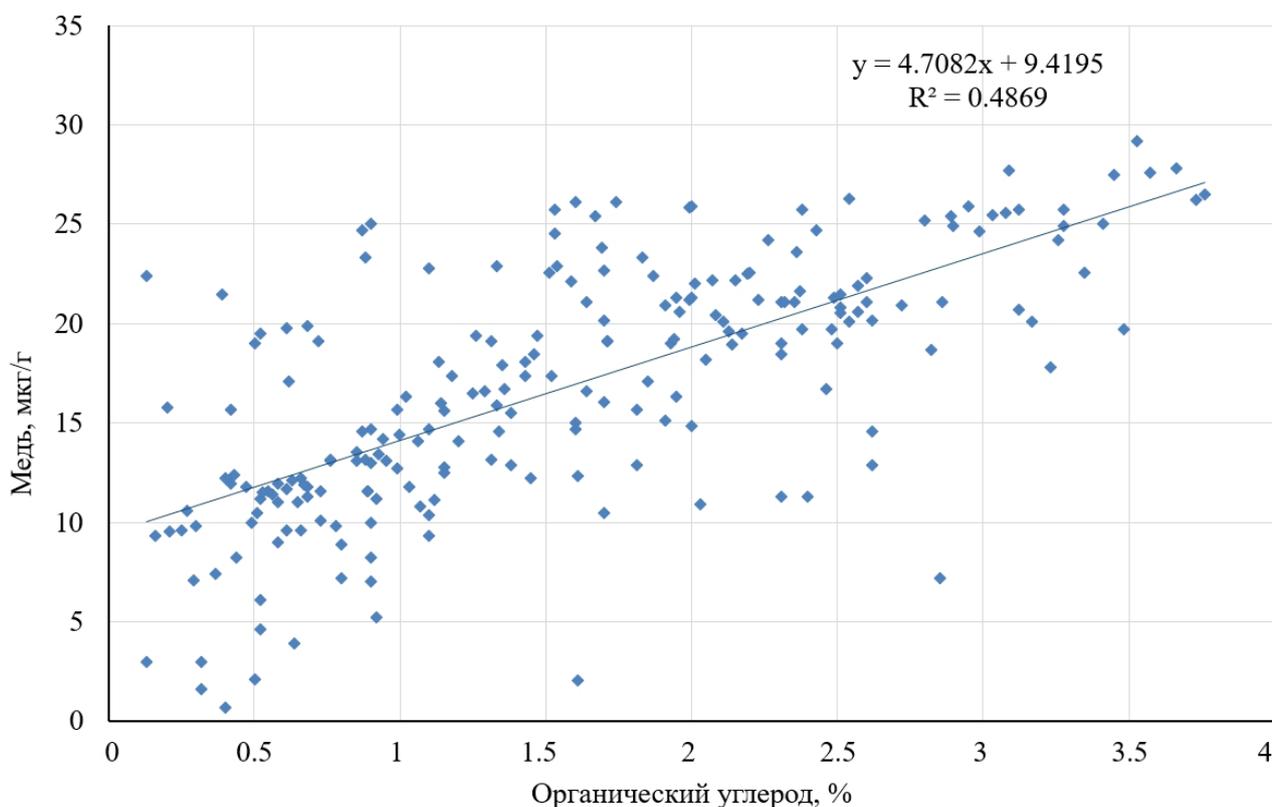


Рис. 6. Связь уровней содержания соединений меди и органического углерода в ДО Баренцева моря.

Эта проблема напрямую связана с вкладом биотического фактора в формирование состава морских донных отложений — деятельностью планктона и донных микроорганизмов (Химия ..., 1979). Последняя, по известным причинам, наиболее активно протекает в обогащенных органикой мелкодисперсных осадках — илах.

Содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в ДО Баренцева моря изменялось от 0.13 до 3.76% со средним значением 1.58%. Кстати, для Восточно-Сибирского моря среднее значение составляло 1.67%, а диапазон колебаний — от 0.29 до 2.27% (Шакиров и др., 2013). На основе собственных данных мы проверили уровень связи между содержанием ряда тяжелых металлов и содержанием $C_{\text{орг}}$ в ДО Баренцева моря. Корреляционный анализ имеющихся в нашем распоряжении данных морских экспедиций за период 2003–2010 гг. в среде Statistica 10 дал следующие результаты. Высокие уровни корреляции не выявлены. Отмечен средний уровень корреляции содержания органического углерода в ДО с медью ($r_s = 0.70$, здесь и далее при $n = 219$ и $p < 0.05$), цинком ($r_s = 0.68$), никелем ($r_s = 0.68$), хромом ($r_s = 0.59$) и свинцом ($r_s = 0.58$). Корреляции с ртутью отсутствовала ($r_s = 0.09$ при $n = 175$). Пример кривой, аппроксимирующей зависимость металлов с содержания $C_{\text{орг}}$ в ДО Баренцева моря, представлен на рис. 6.

Приведенные результаты показывают, что связь содержания ТМ с $C_{\text{орг}}$ достаточно существенная. Можно утверждать, что региональный фон в отношении элементного состава ДО формируется при заметном участии биоты Баренцева моря, главным образом, планктона (Денисенко, Титов, 2001). Принимая во внимание величину коэффициента детерминации ($R^2 = 0.49$), в случае меди, цинка и никеля половина дисперсии значений их содержания в ДО обусловлена присутствием органического вещества. Рассчитанные нами на основе данных Р.Б. Шакирова и др. (2013) наибольшие коэффициенты корреляции между содержанием $C_{\text{орг}}$ и ТМ в ДО Восточно-Сибирского моря были получены для Cr (0,86), Pb (0,69), Zn (0,60) и Ni (0.46). Безусловно, одной из весомых причин приведенных корреляций может быть способность Pb, Cu, Ni, Co, Zn, Cd и других металлов образовывать стойкие комплексы с гумусовыми кислотами воды и ДО (Моисеенко и др., 2011). Таким образом, можно предположить, что вклад биоты в формирование микроэлементного состава ДО относительно устойчив на всем протяжении шельфа российской Арктики.

Авторы выражают благодарность научному сотруднику ФГБНУ «ПИНРО» А.М.Лаптевой. за неоценимую помощь при проведении лабораторных исследований и консультации.

Присутствие тяжелых металлов ДО Баренцева моря в целом имеет комплексный характер и определяется преимущественно глобальным геохимическим фоном с некоторым вкладом региональной компоненты. Фон этот формируется в основном за счет приноса растворенного и взвешенного литогенного материала с западного направления Нордкапским течением.

Величины регионального геохимического фона, выведенные для прибрежной зоны Норвежского моря, могут быть применены и для ДО Баренцева моря за исключением значений содержания никеля и хрома, которые нуждаются в корректировке.

Медь, никель и цинк и свинец, в относительно больших количествах регулярно отмечаются в ДО узкой прибрежной зоны Западного Мурмана. Последнее говорит об их поступлении в море с материковым стоком, в том числе и с территорий, подверженных загрязнению стоками и выбросами предприятий горно-обогатительного комбината «Печенганикель», расположенного в западной части Кольского п-ова.

Признаки техногенного загрязнения в отношении всей акватории Баренцева моря отмечены для свинца, кобальта и ртути.

Биота Баренцева моря посредством трансформации и миграции химических веществ в водной среде играет заметную роль в формировании элементного состава ДО и их обогащения отдельными ТМ, например, никелем.

Список литературы

- Биология и океанография Северного морского пути: Баренцево и Карское моря / Отв. ред. Г.Г. Матишов. М.: Наука, 2007. 323 с.
- Благовещенский Ю.Н., Дмитриева Е.А., Самсонова В.П. Применение непараметрических методов в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. 98 с.
- Виноградова П.С. Новые данные о рельефе дна Баренцева моря // Труды ПИНРО. 1957. Вып.10. С. 244–259.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 1. Баренцево море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеиздат, 1990, 280 с.
- Голубева Н.И., Матишов Г.Г., Бурцева Л.В. Выпадения тяжелых металлов из атмосферы с осадками в регионе Баренцева моря // ДАН. 2005. Т. 401. № 5. С. 683–686.
- Гуревич В.И. Современный седиментогенез и геоэкология Западно-Арктического шельфа Евразии. М.: Научный мир, 2002. 135 с.

- Даувальтер В.А., Кашулин Н.А., Сандимиров С.С.* Тенденции изменений химического состава донных отложений пресноводных субарктических и арктических водоемов под влиянием природных и антропогенных факторов // Труды Кольского научного центра РАН. Апатиты, 2012. Прикладная экология Севера. Вып. 2 Т. 2 (9). С. 55–88.
- Денисенко С.Г., Титов О.В.* Распределение зообентоса и первичная продукция планктона в Баренцевом море // Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перигляциала. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2001. Т. 2. С. 50–64.
- Добровольский В.В.* География микроэлементов: Глобальное рассеяние. М.: Мысль, 1983. 272 с.
- Добровольский А.Д., Залозин Б.С.* Моря СССР. М.: Изд-во МГУ, 1982. 192 с.
- Жилин А.Ю., Плотицына Н.Ф.* Характеристика состояния загрязнения элементов экосистемы Баренцева моря в 2012 г. // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование». Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2013. С. 156–178.
- Ильин Г.В., Матишов Д.Г., Касаткина Н.Е.* Формирование антропогенного загрязнения и экосистемное здоровье морей Российской Арктики // Комплексные исследования больших морских экосистем России. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2011. С. 277–325.
- Корнеев О.Ю., Рыбалко А.Е., Федорова Н.К.* Федеральный мониторинг геологической среды западно-арктического шельфа — состояние, объекты и перспектива // Материалы международной конференции «Нефть и газ арктического шельфа — 2008». Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2008. Секция 5. Экология, мониторинг и охрана окружающей среды. С. 179–182.
- Леин А.Ю.* Исследование морей Российской Арктики: мыслим процессами // Природа. 2014. № 8. С. 11–19.
- Матишов Г.Г., Павлова Л.Г., Ильин Г.Г.* Гидрохимические и геохимические процессы в экосистеме Баренцева моря // Химические процессы в экосистемах северных морей (гидрохимия, геохимия, нефтяное загрязнение). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1997. С. 5–185.
- Моисеенко Т.И., Панчева Л.П., Дину М.И. и др.* Инактивация токсичных металлов в водах суши гумусовыми веществами // Вестник Тюменского государственного ун-та. 2011. № 5. С. 6–19.
- Минэнерго: добыча на Приразломном в 2015 году должна вырасти в вдвое — до 800 тыс. тонн нефти // ТАСС: Экономика и бизнес (6 февраля 2015 г.). <http://tass.ru/ekonomika/1749228>.
- Митяев М.В.* Мурманское побережье (геолого-морфологические и климатические особенности, современные геологические процессы). Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2014. 226 с.
- 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.
- Мнацаканян О.С., Пушнов В.М., Сочнев О.Я. и др.* Воздействие поисково-оценочных работ на экосистемы Печорского моря. М.: ЦНИИ-ГЭнефтехим, 2002. 204 с.
- Мур Дж.В., Рамамурти С.* Тяжелые металлы в природных водах: Контроль и оценка влияния. М.: Мир, 1987. 288 с.
- Плотицына Н.Ф., Жилин А.Ю.* Характеристика состояния загрязнения элементов экосистемы Баренцева моря в 2010 г. // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование». Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2011. С. 259–294.
- Сорокин А.Л.* Ландшафты шельфа Кольского полуострова: геолого-морфологические основы формирования. Мурманск: Книжное изд-во, 1987. 128 с.
- Химия океана. Т. 2. Геохимия донных осадков / Отв. ред. И.И. Волков. М.: Наука, 1979. 536 с.
- Червякова Ю.И.* Комплексный анализ загрязнения атмосферного воздуха Мурманской области предприятиями металлургической и горно-химической промышленности за период с 2000 по 2012 годы // VI Международная студенческая электронная научная конференция. Студенческий научный форум 2014. <http://www.scienceforum.ru/2014/413/5229>.
- Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И.* Газогеохимические аномалии в осадках Восточно-Сибирского моря // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 1. Вып. 21. С. 98–110.
- Шевченко В.П.* Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
- Шевченко В.П., Лисицын А.П., Бобров В.А. и др.* Аэрозоли в природных планшетах Арктики // Материалы международной конференции «Современные экологические проблемы Севера (К 100-летию со дня

НОВИКОВ, ЖИЛИН

рождения О.И. Семенова-Тян-Шанского)». Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2006. Ч. 1. С. 19–21.

Bakke T., Breedveld G., Kællgvist T. et al. Veileder for klassifisering av miljøkvalitet i fjorder og

kystfarvann — Revisjon av klassifisering av metaller og organiske miljøgifter i vann og sedimenter // SFT Veiledning, 2007. 12 p. (in Norwegian).

DISTRIBUTION OF HEAVY METALS IN BOTTOM SEDIMENTS OF THE BARENTS SEA BASED ON THE RESULTS FROM STATISTICAL ANALYSIS

M.A. Novikov, A.Yu. Zhilin

Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (PINRO), Murmansk, 183038;

The content of heavy metals in the bottom sediments of the Barents Sea was analyzed using a large volume of long-term data. We used the methods of mathematical statistics and GIS technologies to consider the background content of heavy metals in bottom sediments and contribution of anthropogenic component. Among all the studied metals, a noticeable exceeding of available background content in bottom sediments was only revealed for nickel and chrome. The traces of technogenic contamination were only registered for lead, cobalt, and mercury. The background content for nickel and chrome in the Barents Sea bottom sediments requires updating.

Keywords: Barents Sea, bottom sediments, element composition, heavy metals.