

ОСОБЕННОСТИ ОСАДОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ В АРКТИКЕ

Лисицын А.П., Будько Д.Ф., Демина Л.Л., Кравчишина М.Д., Леин А.Ю., Немировская И.А., Стародымова Д.П., Шевченко В.П.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

e-mail: lisitzin@ocean.ru

Введение

Зональность осадкообразования в морях и океанах во всей полноте проявилась только после детального изучения донных осадков на всех широтах и глубинах океанов, во всем разнообразии среды. Первые в стране пробы глубоководных океанских осадков удалось получить только в 1949 г. – с первых рейсов НИС «Витязь» в Тихий океан и дальневосточные моря. Одним из открытий было обнаружение окатанного гравийно-галечного материала в тонких илах на глубинах 2–4 км и больше. С ростом широты места количество этого материала возрастало.

Анализ состава галек показал, что в значительной части это не базальты, характерные для подводных гор и коры океанского типа, а, наоборот, кислые и средние магматические, осадочные и метаморфические породы, характеризующие кору континентального типа и запретные для коры океанской.

Детальные исследования этого материала (количество, состав, свойства) на тысячах проб позволили выяснить происхождение каменного материала в глубоководных илах, определить петрографические провинции на дне и пути движения грубообломочного материала – от берегов к центральным частям морей. Эти пути оказались близкими к путям движения поверхностных льдов. Удалось проследить процессы захвата донных осадков из прибрежной зоны при отрыве припая. Эти процессы достигают максимума в полярную ночь. Мощные процессы захвата, переноса, а затем отложения при таянии имеют не только зональное и региональное, но и глобальное значение – они обнаружены и изучены не только в северной части Тихого океана, но также в Арктике и Антарктике, и это одна из характерных особенностей нового вещественно-генетического типа литогенеза – морской ледовой седиментации [1, 2].

В морях Российской Арктики детальные исследования проведены в Карском море [3, 4], разворачиваются такие исследования на Белом и Баренцевом морях.

Имеются немногочисленные данные о рассеянном каменном материале в осадках Центральной Арктики, но они обычно интерпретируются как свидетельство выходов коренных пород, что, как правило, не подтверждается. Было показано, что рассеянный в глубоководных илах каменный материал имеет исключительно важное значение для палеогеографических и тектонических построений.

В Антарктике удалось установить особый тип седиментации (айсберговый), характерной особенностью которого является разгрузка в океан осадочного материала при таянии айсбергов, образовавшихся при сползании в океан материковых льдов, захвативших осадочное вещество ледосборов (мощность льдов здесь 10 км). По петрографии и минералогии каменного и песчаного материала, рассеянного в донных осадках, удалось установить состав и возраст пород, скрытых толщей льдов, судить об их геологии и тектонике [1, 5]. Эти исследования следует продолжить в Северном полушарии для уточнения реконструкции центров оледенения и путей движения льдов и айсбергов. Перенос грубообломочного и песчаного материала льдами по поверхности – это только одна из особенностей ледовой седиментации, которая не учитывалась теорией литогенеза.

Другая важная особенность – явление «ледового насоса», который избирательно удаляет минеральные и биогенные частицы из воды и включает их в поля дрейфующих

льдов. В полярную ночь с минимальными температурами (до -40°C – -50°C в сибирской части Арктики) возникают обширные области чистой воды. Они связаны с отжимными ветрами, которые отгоняют дрейфующие льды от кромки припая. Самая крупная из них – Сибирская полынья длиной часто более 1–2 тыс. км, связанная с сильными ветрами стационарного Восточно-Сибирского антициклона [6]. Поверхностные воды полыньи переохлаждаются с образованием кристаллов льда вокруг ядер конденсации – частиц морской взвеси. Эти кристаллы легче морской воды (холодная дистилляция) и всплывают на поверхность, где связываются в шугу, а затем в лед. Таким образом, ледовый насос забирает частицы взвеси из воды и вмораживает их в дрейфующий лед. Это дополнительное обогащение льда органической и минеральной взвесью.

Следует заметить, что массовое превращение морской воды в почти пресный лед – это процесс холодной дистилляции глобальных масштабов, последствие которого пока только начинают учитывать. При дистилляции и кристаллизации из льда отжимаются растворенные формы элементов, в том числе опасные загрязнения.

Морской лед – почти пресный, в ходе дрейфа в Северном Ледовитом океане (поток замороженной пресной воды на поверхности моря) проходит многие тысячи километров. Паковые (многолетние) льды существуют до 10–15 лет, и кроме осадочного вещества, захваченного при их замерзании, они пополняются еще веществом из атмосферы, оседающим на поверхности льда.

Разгрузка льдов от осадочного вещества в Арктике происходит в проливе Фрама между островами Шпицберген и Гренландия. Ледовые поля здесь встречают теплое Атлантическое течение и тают не только летом, но и зимой. Возникает ледовый депоцентр Северного полушария, который почти не изучен, хотя с ним связана холодная ветвь глобального круговорота вод (рис. 1).

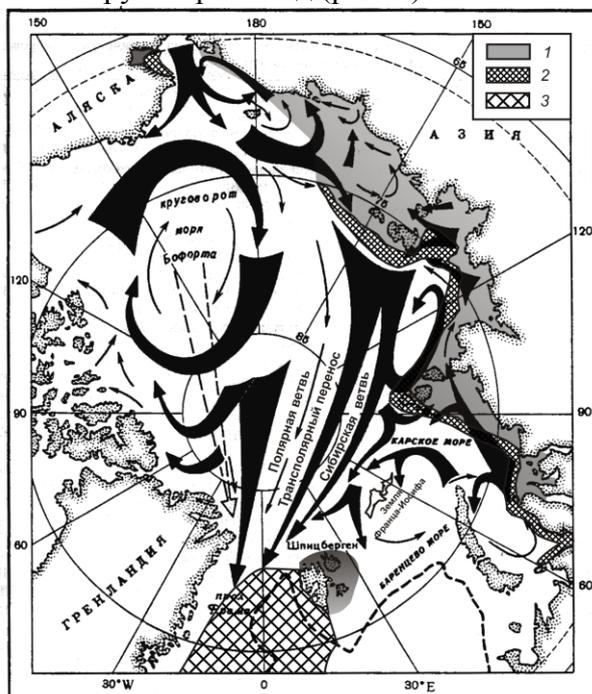


Рис. 1. Основные трассы переноса и области разгрузки осадочного материала морских льдов Арктики: 1 – области развития припая (захват грубообломочного материала, вмержшего в лед); 2 – положение основных заприпайных зимних полыней (образование внутриводного льда, захват взвеси из воды); 3 – криодепоцентр пролива Фрама – разгрузка ледовых полей под действием теплого Атлантического течения (таяние круглый год).

Ледовая седиментация в Арктике и Субарктике, как видим, изучена совершенно недостаточно, несмотря на усилия ИО РАН, в частности, 15 лет исследований в Белом море [7–9]. Процессы осадконакопления и биогеохимии в ледовых зонах – это новая и очень важная тематика. Они многообразны и сложны, и это пока одно из «белых пятен» в океанологии и морской геологии. На современном этапе исследований стало очевидным, что для понимания сути этого нового типа седиментации необходимо изучение не только речного стока, который, по нашим прямым исследованиям разгружается в маргинальных фильтрах (на 90% для взвеси и 40% для растворенных форм) [5, 10], т.е. в пелагиаль поступает 1/10 осадочного вещества. Понятно, что необходим учет поступления осадочного вещества из других источников-геосфер. Это криосфера (ее осадочный материал доминирует в водах и донных осадках Арктики и рассеянный грубообломочный материал на это указывает). Это, как будет показано, вещество атмосферы, биосферы, гидросферы (ее морская часть), седиментосферы, антропоферы (загрязнения).

Внутренние геосферы особенно ярко проявляются на подводном активном хребте Гаккеля, где обнаружены выходы гидротерм и «черные курильщики», а также во всей тектонической структуре Северного Ледовитого океана в истории его развития [11].

Осадочный материал геосфер попадает в верхние слои моря, где смешивается с морским биогенным материалом и после биофильтрации (биофильтр-1 – фитопланктон, биофильтр-2 – зоопланктон) в форме пеллет поступает в глубинные слои и на дно, превращается в донный осадок, причем по всем показателям отличный от осадков безледных зон Мирового океана.

Размеры статьи не позволяют более подробно описать эти процессы, тем более что их изучение в Арктике с применением новых методов и подходов только начинается и сдерживается недостатком средств – необходимо не рейсовое, а непрерывное исследование обсерваторного типа [7–9].

Общепринятые методы морской геологии в Арктике оказались недостаточными в связи с суровыми условиями льдов и полярной ночи. Удавалось получать только отрывочные данные, полученные с дрейфующих льдов или во время короткого (1–3 месяца) полярного лета. Большая часть материалов относится к августу–сентябрю, что совершенно не достаточно (данные по главной части года отсутствуют). В связи с этим нами была разработана методика автоматических глубоководных обсерваторий (АГОС), которая обеспечивает круглогодичное изучение океанологии и осадочного процесса в толще вод под дрейфующими льдами [9].

Геологическая (седиментологическая) обсерватория включает туго натянутый полипропиленовый трос, который идет от якоря до притопленного (ниже освещенного слоя) поплавка, обеспечивающего натяжение 150–200 кг. На тросе располагаются океанологические приборы круглогодичного действия и седиментационные ловушки. Ловушки цилиндрической или конической формы с флаконами в нижней части. Они заполнены фиксирующим раствором и накапливают оседающий из воды осадочный материал. Применяют ловушки 12-стаканные со сменой флаконов 1 раз в месяц и одностаканные – работающие непрерывно на протяжении года. Обсерватории устанавливают обычно на 1 год с размещением приборов на глубинах от поверхности до дна. В состав обсерватории входят также измерители течений и другие приборы.

Далее мы приводим новые данные по переносу аэрозольного материала, изучению взвешенных частиц в толще вод (на примере Карского и Белого морей и моря Лаптевых), а также о формах нахождения тяжелых металлов – опасных загрязнителей-токсикантов, новые данные о концентрации метана в водах Арктики, имеющие большое значение для планирования бурения, данные о содержании углеводов в арктических водах в 2006–2014 гг.

Исследование аэрозолей

Атмосферный перенос взвешенных частиц – самый быстрый канал поступления многих веществ (включая черный углерод) в удаленные районы. Этот механизм переноса вещества имеет особенно большое значение для окружающей среды Арктики [2, 12–14]. Черный углерод является продуктом неполного сгорания различных видов топлива (в особенности угля и дизельного топлива), биомассы (леса, травы, сельскохозяйственных отходов) или биотоплива. Аэрозольный черный углерод является компонентом атмосферы, вносящим значительный вклад в климатические изменения в Арктическом регионе [15]. Основной составляющей черного углерода является элементный углерод (ЭУ). В результате горения различных видов топлива и ряда биологических и физико-химических процессов в атмосферу поступает также органический углерод (ОУ). В аэрозолях приземного слоя атмосферы на полуострове Киндо (рис. 2) в окрестностях Беломорской биостанции им. Н.А. Перцова МГУ им. М.В. Ломоносова (побережье Кандалакшского залива Белого моря) концентрации ОУ характеризуются сильной сезонной и годовой изменчивостью [16]. Показано, что также источником ОУ в летний период являются лесные пожары, как местные, так и удаленные. Лето 2010 г. было аномальным по концентрациям ОУ в воздухе, что может быть обусловлено как явлением конденсации газообразных органических веществ, образующихся при жизнедеятельности деревьев в начале лета, так и действием лесных пожаров в середине лета. В осенне-зимний и весенний период существенным источником поступления ОУ являются индустриально развитые районы Кольского полуострова.

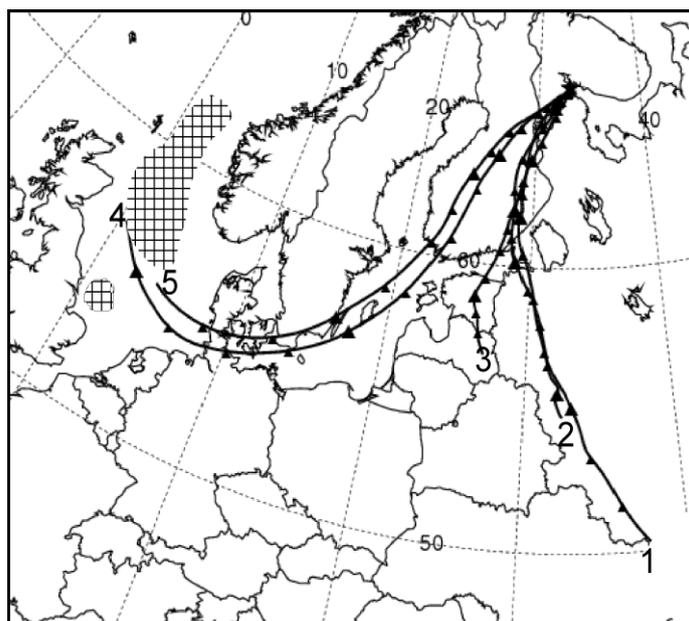


Рис. 2. Обратные траектории воздушных масс, прибывающих на п-ов Киндо (Белое море) 31.07–02.08.2010 [15]. Траектории рассчитаны по данным [<http://www.arl.noaa.gov/>] с шагом 12 ч. Области распространения нефтегазовых факелов заштрихованы.

Концентрации ЭУ, во многих публикациях называемого черным (сажевым) углеродом, в этом районе находятся на фоновом для Арктики уровне [17–21] и характеризуются незначительной сезонной и годовой изменчивостью. Существенным источником ЭУ является западный перенос со стороны индустриально развитых районов Северной Европы, в том числе газовые факелы нефтяных месторождений Северного моря (рис. 2). В летние месяцы лесные пожары являются дополнительным источником ЭУ.

Исследование взвеси

Концентрация взвеси в деятельном слое Карского моря (~1.2–1.3 мг/л среднее для 2007, 2011 гг.) близка к соответствующим значениям в Белом море (~1.4 мг/л среднее для 2003–2010 гг.) и в море Лаптевых (~1.7 мг/л среднее для 2003, 2004, 2007, 2008 гг.) [22–24]. Взвесь Карского и Белого морей представлена переходным (от речного к морскому) или смешанным типом. Средние значения концентрации для этих морей в 3–4 раза превышают аналогичное значение для Баренцева моря, которое не имеет значимого речного стока.

На основе данных спутниковых сканеров цвета по стандартным алгоритмам рассчитана концентрация морской взвеси в поверхностном слое. Эти данные (с применением регионального алгоритма) хорошо согласуются с результатами наших прямых измерений ультрафильтрацией. Полученные положительные результаты указывают на правильность концепции создания региональных алгоритмов и открывают перспективы к разработке таких алгоритмов для всех морей арктического бассейна. Указанная методика успешно применяется авторами для создания региональных алгоритмов в морях Белом, Баренцевом и Карском [24–26].

Межгодовая изменчивость концентрации взвеси в Белом море за период 2003–2010 гг. по спутниковым данным невелика и не выходит за пределы 18%, т.е. статистически незначима. Установлена взаимосвязь между динамикой среднегодовых концентраций взвеси Белого моря и стокового Двинского течения [24].

Установлены основные источники взвеси в Белом и Карском морях: минеральные частицы речного генезиса, морской фитопланктон и др. В первую очередь это взвешенный материал, поставляемый с водосбора с речным стоком (наиболее интенсивен в мае–июне) и поступающий вследствие таяния снежно-ледового покрова (обычно в апреле–мае). Обилие фитопланктона обусловлено сочетанием многих абиотических факторов, в том числе, связано с поставкой биогенных элементов и таянием льда.

Основная часть материала береговой абразии в морях Белом и Карском (в первую очередь песчано-алевритовая фракция) оседает в мелководной прибойной зоне и в области вдольбереговых потоков.

Материал, поступающий с талыми водами с берегов архипелага Новая Земля, не вносит значимого вклада в концентрацию взвеси открытых районов Баренцева и Карского морей [26, 27]. Концентрация взвеси в изученных заливах восточного побережья Новой Земли составляла 1–3 мг/л.

Изолинии повышенных концентраций взвеси в морях западной части российской Арктики (Белое, Баренцево и Карское), в целом, повторяют контур береговой линии. Значения концентраций уменьшаются в 5–10 раз по мере удаления от берегов. Повышенные концентрации взвеси (>1–5 мг/л) приурочены к устьевым областям рек и локализуются, как правило, в сравнительно узкой (обычно до 20 км) прибрежной полосе. Концентрация взвеси в прибрежной зоне во многом зависит от условий ветрового и приливного перемешивания вод и сортировки поступающего с суши вещества по гидравлической крупности.

Гидрологические фронты (локальные апвеллинги, маргинальные фильтры рек) нарушают картину монотонного уменьшения концентрации взвеси в направлении от побережий в пелагиаль. В этих областях формируются градиентные зоны: взвесевые фронты и биогеохимические барьеры, положение которых может меняться во времени. В маргинальных фильтрах рек распределение взвеси во многом определяется положением изохалин: с ростом солёности происходит снижение концентрации взвеси по экспоненте, а ее потери достигают 79–95%. Работа маргинальных фильтров впервые была описана на примере зоны смешения пресных и соленых вод р. Обь – Карское море

и р. Енисей – Карское море [5, 10]. Соленость воды, главным образом, контролирует распределение концентрации взвеси в поверхностном водном слое на внутреннем шельфе. Основное преобразование состава взвеси эстуария в морскую взвесь шельфовых вод происходит в пределах соленостной фронтальной зоны, структура и положение которой подвержено сезонной и межгодовой изменчивости.

В 2007 г. в маргинальном фильтре р. Обь установлены повышенные концентрации взвеси в поверхностном слое (в среднем 26 мг/л в пресной воде и 16 мг/л при солености 3–10 епс), по сравнению с данными литературы за предшествующие годы. Концентрация взвеси и доля терригенной составляющей в ней в эстуарии Оби (2007 г.) была в ≥ 10 раз выше, чем в эстуарии Енисея (2011 г.). В 2011 г. влияние терригенного вещества на состав морской взвеси ослабевало в северном направлении, что было показано впервые в работе [28]. Аномальное опреснение поверхностного слоя моря в 2007 г. привело к значительному облегчению изотопного состава органического углерода взвеси в западной части Карского моря, то есть влияние терригенного вещества на состав взвеси лишь незначительно ослабевало в северном направлении [23].

Распределение концентрации взвеси в Карском море характеризуется, в первую очередь, широтной зональностью от Обь-Енисейского мелководья до подножия континентального склона (рис. 3). Процессы кросс-шельфового переноса взвеси (и существующая в море, так называемая, кросс-шельфовая зональность) являются топографически привязанными [23].

Нефелоидный слой обнаруживается практически повсеместно в пределах шельфовой области Карского моря, в Белом и Баренцевом морях. Мощность слоя (от нескольких до первых десятков метров) и концентрация взвеси в нем (от нескольких до десятков мг/л) зависит от глубины моря, скорости ветра, наличия течения, гранулометрического состава донных осадков, фазы прилива и др. По нашим представлениям, процессы, приводящие к формированию этого слоя, наиболее интенсивно генерируются в придонной зоне, ограниченной 100-метровой изобатой. Глубже эти процессы несколько затухают. Концентрации взвеси в нефелоидном слое Белого моря близки к ее значениям в нефелоидном слое Баренцева моря. В морях Карском и Лаптевых мутность и мощность этих слоев обычно значительно выше, чем и в Белом и Баренцевом морях.

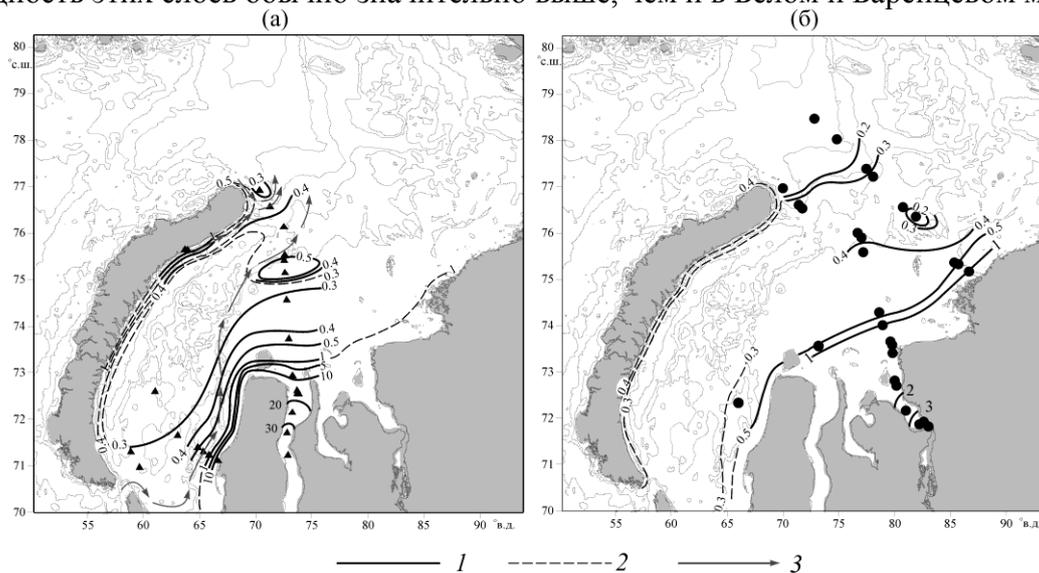


Рис. 3. Распределение концентрации взвеси (мг/л) в поверхностном слое воды Карского моря в сентябре 2007 г. (а) и 2011 г. (б): 1 – изолинии по данным натуральных измерений; 2 – изолинии по данным спутникового сканера цвета моря MODIS-Aqua; 3 – схема циркуляции вод в верхнем стометровом слое в сентябре 2007 г.

Исследовано геохимическое поведение группы микроэлементов в водной толще на разрезе эстуарий р. Енисей – Карское море, 11 станций, 59-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш», сентябрь–октябрь 2011 г. Найдена прямая значимая корреляционная зависимость между мутностью и содержанием некоторых взвешенных металлов (мкг/л), в частности, меди и железа. Это подтверждает общую закономерность распределения осадкообразующих компонентов, установленную ранее для других морских бассейнов. Впервые обнаружена прямая положительная связь между содержанием взвешенной меди и объемной концентрацией взвеси ($\text{мм}^3/\text{л}$), что, по-видимому, обусловлено вкладом агрегатов фитопланктона в состав взвеси [29].

Впервые выявлен тренд повышенного накопления мышьяка в пелитовой фракции взвеси (2–10 мкм), свидетельствующий о важной роли сорбционных процессов в геохимии мышьяка [29].

Исследование форм нахождения тяжелых металлов в донных осадках

Изучены физико-химические формы нахождения Fe, Mn, Cu, Co, Cr, Ni, Cd, Pb в поверхностном слое донных осадков Белого моря на осевом разрезе Двинский залив – Кандалакшский залив. Методом последовательной селективной экстракции по схеме, принятой для исследований эстуарных, морских и океанских донных осадков [30–32], разделялись геохимически подвижные (обменный комплекс, связанные с карбонатами, аморфными Fe-Mn гидроксидами и органическим веществом) и инертные (литогенные) формы элементов. Концентрации металлов в четырех вытяжках определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). По нашим данным, от 60 до 95% (в среднем 80%) общего содержания Fe находится в геохимически инертной форме, доля которой возрастает на осевом разрезе при движении от Северной Двины в сторону Кандалакшского залива. В среднем 15% Fe находится в составе аморфных гидроксидов и примерно по 2% – в адсорбированной и связанной с карбонатами и органическим веществом формах. Примерно такой же характер распределения между формами демонстрируют Cr и Ni, хотя доля литогенной формы ниже и не превышает 80%. Напротив, для Mn, Cd, Cu, Co и Pb преобладают геохимически подвижные формы, составляющие в среднем от 70 до 90% общего содержания. В большинстве случаев высокие содержания подвижных форм металлов определены в донных осадках центральной части Белого моря, для которых характерно преобладание тонкозернистых (до 90–95% пелитовой фракции) осадков с повышенными адсорбционными характеристиками, тогда как пониженные значения найдены преимущественно в мелководных донных осадках, где преобладают песчаные фракции, обладающие пониженными адсорбционными качествами и низким содержанием органического вещества. Средние значения соотношения исследованных форм нахождения металлов показаны на рис. 4.

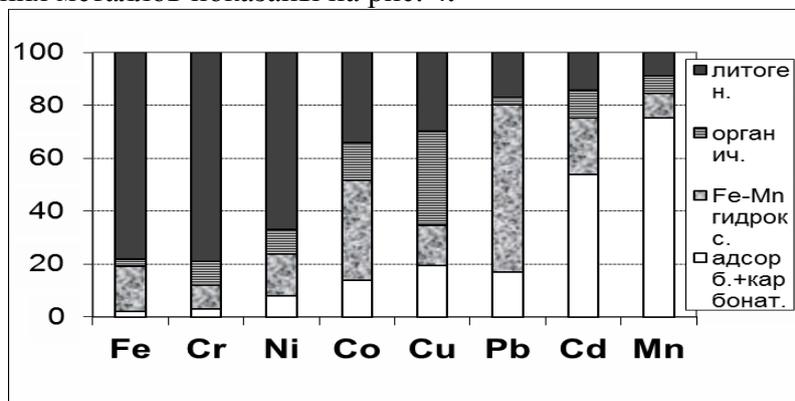


Рис. 4. Среднее соотношение форм нахождения тяжелых металлов в поверхностном слое (0–5 см) донных осадков Белого моря.

Исследование потоков метана

В открытых водах пяти морей российской Арктики средняя концентрация метана колеблется от 3.6 до 14.5 нМ [34]. В поверхностных слоях водной толщи в заливах и эстуариях, в речных водах, подледной воде и в барьерных зонах река–море концентрация метана может возрастать на несколько порядков величин. Основными внешними источниками потока метана в арктические моря и в Северный Ледовитый океан являются североатлантические и тихоокеанские воды. Речные потоки, несмотря на высокую в них концентрацию метана, в 8–20 раз уступают по величине потоку метана с североатлантическими водами. Неизвестны пока количественные оценки потоков метана, связанных с разгрузкой газово-водных струй (сипингов), и потоков метана, образующихся при диссоциации субмаринных газогидратов. Для их оценки необходимы дальнейшие исследования: геофизические, геолого-геохимические и бурение. Собраны научные данные, необходимые для выбора районов исследования газогидратов.

Загрязнение нефтью – современное состояние и перспективы

До последнего времени считалось, что решающий вклад в суммарное поступление нефтяных углеводородов (УВ) в моря Арктики принадлежит речному стоку, благодаря которому потоки нефти могут исчисляться десятками и сотнями тысяч тонн в год [35]. Взвеси, поступающие с реками, обогащены различными соединениями, и становятся своеобразными "геохимическими ловушками", способствующими аккумуляции компонентов речного стока, в том числе и антропогенных [36]. Действительно, наши исследования, проведенные в поверхностных арктических водах, показали, что наибольший диапазон концентраций наблюдался в приустьевых районах – маргинальных фильтрах рек.

В водах Северной Двины так же, как в водах других северных рек, УВ преимущественно содержатся в растворенной форме (УВ_р), так как реки протекают по почвам, богатым гумусом. В остальных пробах содержание УВ во взвеси (УВ_в) на разрезе река–море выше, чем УВ_р. Во время прилива увеличивалась разница в концентрациях УВ_в между речными и морскими водами. Их «потери» на границе река–море достигали 63% (табл.).

Таблица. Потери УВ (%) на геохимическом барьере река-море

Река	Горизонт/год	Потери	Река	Горизонт	Потери
			Лимпопо	пов.	68/92
Сев. Двина, межень	пов., 2001, прилив	25/0*	Замбези	пов.	65/82
	пов., 2003, прилив	33/14	Нева	ПМС	47/20
	пов., 2006, прилив	24/15		пов.	63/85
	пов., 2007, отлив	-/67	Неман	пов.	75/-
половодье	пов., 2006	8/27	Амур	пов.	10/75
Кемь	пов., 2011	-/82		дно	50/-
Обь**	пов., 1993	-/25	Даугава	ПМС	68/48
Обь	пов., 2007	37/27		пов.	88/80
Енисей**	пов., 1993	-/17		дно	77/80
Енисей	пов., 2011	10/26	Днепр	пов.	84/80
Конго	пов.	47/73	Рона ***	пов., 1994 г	-/76

*25/0 – растворенные/ взвешенные; ** [37]; *** [38]

Содержание УВ контролировалось изменением количества взвеси, и между этими соединениями существовала зависимость: $r(\text{взвесь}-\text{УВ}_в)=0.78$. Наиболее резко содержание УВ_в уменьшалось в гравитационной области до $S=1.4$ епс. Нефтяной состав

УВ установлен только в поверхностных водах Северной Двины (гравитационная часть маргинального фильтра). Осенью 2014 г. в устье Северной Двины содержание УВ_в (33.2 мкг/л) не достигало величины ПДК для нефтяных УВ (50 мкг/л) и в пересчете на мг взвеси составило всего 5.8 мкг.

Во время весеннего половодья содержание УВ в водах маргинального фильтра Северной Двины значительно превысило их концентрации по сравнению с летней меженью. Наиболее резко изменялось их содержание во взвеси: от 560 до 130 мкг/л, при этом концентрации по направлению к заливу уменьшались в 2–11 раз. При весеннем таянии снега и льдов в речную воду переходят накопленные в них за длительный зимний период из атмосферы и из водосбора большое количество органических соединений (ОС), биогенных элементов и тяжелых металлов. Поэтому их повышенное количество (36–66 мкг/мг взвеси) наблюдалось в районах слива загрязненных вод АЦБК и в протоке Маймакса. Напротив, в относительно чистых районах (в устье р. Пинеги, впадающей в Северную Двину до г. Архангельска) при довольно высокой концентрации взвеси (32.2 мг/л) доля УВ_в в составе С_{орг} понижалась до 12.9%, и составляла всего 4.2 мкг/мг взвеси. Вследствие этих причин не наблюдалась корреляция между распределением взвеси и ОС в ней: $r(\text{вз.}-\text{лип.})=-0.06$, $r(\text{вз.}-\text{УВ}_в)=-0.11$. В тоже время существовала связь между содержанием липидов и УВ_в: $r(\text{УВ}_в-\text{лип.})=0.97$, видимо липидная фракция в основном состояла из УВ.

Содержание УВ в донных осадках зависит от их гранулометрического типа. Во время летней межени в 2006 г. более высокие концентрации УВ установлены в кутовой части Двинского залива в зоне лавинной седиментации (рис. 5). Концентрации УВ были также повышены на станции, находящейся под влиянием вод, поступающих из Двинского залива в район Горла (62.5 мкг/г), а также на станции в районе Соловецких о-вов (80.2 мкг/г). Пассивная сорбция антропогенных УВ донными осадками при небольших глубинах приводит к повышению их доли в составе С_{орг} в песчаном осадке из Двинского залива – до 6.4%. Напротив, в осадках Бассейна доля УВ в составе С_{орг} понижена (0.29–0.44%). Поэтому степень антропогенной загрязненности грубодисперсных осадков выше, чем илистых. Снижение концентраций УВ, отобранных летом 2010 г. (рис. 5), обусловлено тем, что был отобран слой осадка 0–4 см, а в 2006 – окисленный слой 0–0.5 см. При переходе от окисленных к восстановленным осадкам содержание УВ обычно уменьшается [39]. Наиболее высокое содержание УВ, так же, как и С_{орг} установлено в 2010 г. в илистых осадках губы Ругозерской (до 96 мкг/г и 1.06% соответственно). В открытых районах моря их концентрации снижались. При высокой концентрации УВ в пересчете на сухую массу (33–96 мкг/г) илистые осадки отличались низкой концентрацией УВ в составе С_{орг} (0.18%). На периферии Двинского залива и в проливах Соловецкой Салмы доля УВ повышалась до 0.32%.

В осадках, отобранных в летнее время в 2012–2014 гг., концентрации УВ в илистых осадках оставались на уровне 2010 г., в среднем 16 мкг/г, но в песчаных осадках снизились синхронно с С_{орг}. Обусловлено это тем, что осадки отбирали в основном в открытых районах моря. Снижение концентраций УВ в последние годы может свидетельствовать об эффективности используемых мер по предотвращению нефтяного загрязнения.

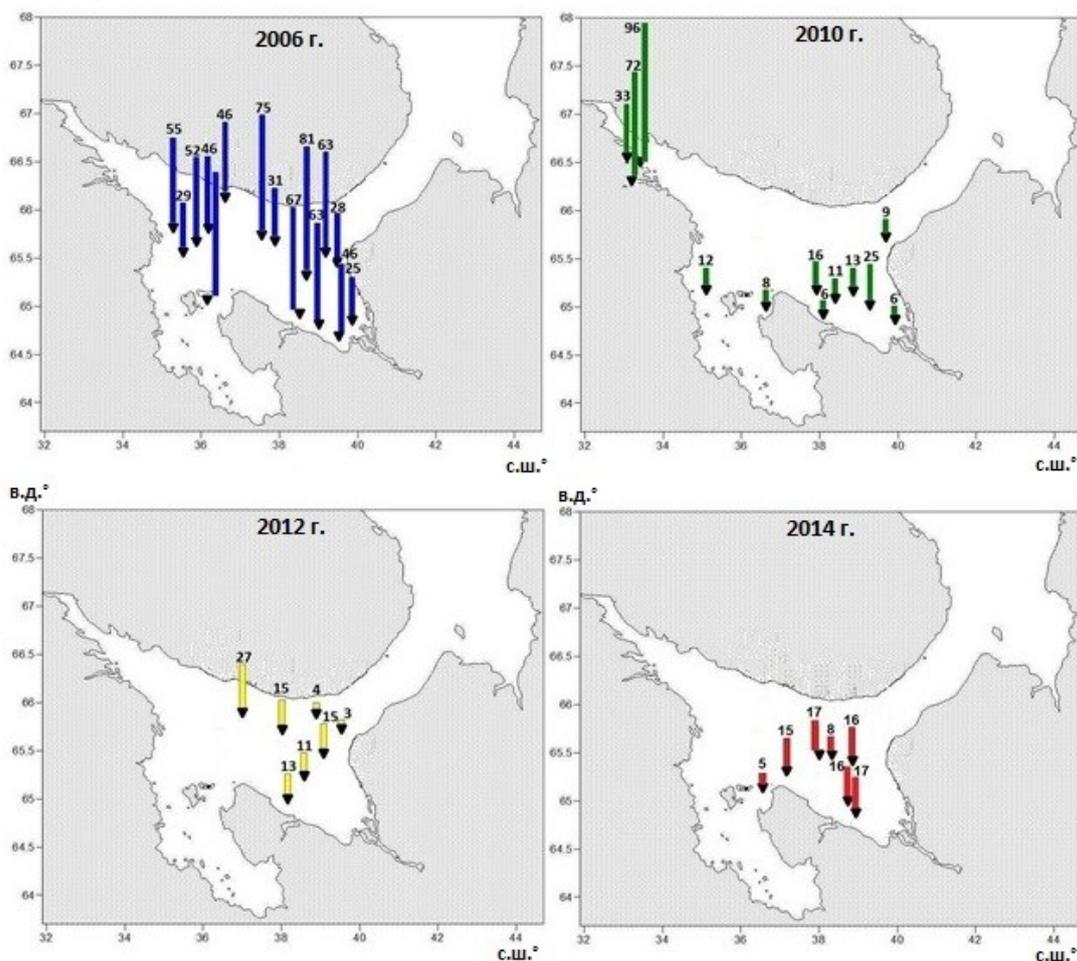


Рис. 5. Изменение концентраций УВ в донных осадках Белого моря (сверху обозначены концентрации мкг/г) в разные годы исследования.

Во время половодья для донных осадков рукавов дельты Северной Двины, несмотря на довольно постоянный их гранулометрический состав (преобладала песчано-алевритовая фракция), характерна высокая дисперсность концентраций как для УВ (13.1–329.4, средняя 105.7, $\sigma=73.4$ мкг/г), так и для $C_{\text{орг}}$ (0.015–3.31%, средняя 1.02, $\sigma=2.98\%$). Обусловлено это множественностью источников поступления ОС. В то же время для всего массива данных гранулометрический фактор оказывает основное влияние, так как в целом наблюдалась зависимость между распределением изучаемых ОС: $r(C_{\text{орг}}-\text{УВ})=0.81$. Это может свидетельствовать об одинаковых путях поступления природных и антропогенных соединений в донные осадки, а также о быстрой трансформации нефтяных УВ. Однако в рукавах Северной Двины, где поток загрязнений возрастал, эта зависимость отсутствовала (в частности в протоке Кузнечиха $r(C_{\text{орг}}-\text{УВ})=0.19$). При увеличении в воде концентраций УВ, даже за счет пассивной сорбции взвесью, может возрастать их содержание в песчаных отложениях. Поэтому доля УВ в составе $C_{\text{орг}}$ грубодисперсных осадков выше, чем в илистых. В районах потенциального поступления нефтяных УВ (АЦБК, Чижовский рейд, порт Экономия) концентрация УВ в составе $C_{\text{орг}}$ достигала 36%. В морских донных осадках содержание УВ <50 мкг/г в илистых и <10 мкг/г в песчаных осадках считаются фоновыми, при этом их доля в составе $C_{\text{орг}}$ обычно $\leq 1\%$ [39, 40]. Несмотря на столь высокие концентрации УВ, в составе алканов в высокомолекулярной области доминировали терригенные УВ, которые обладают наибольшей стабильностью. Признаки, характерные для нефтяных УВ, были

установлены в районе слива загрязненных вод АЦБК, однако и здесь преобладали высокомолекулярные алканы. В Никольском рукаве и в протоке Маймакса некоторое увеличение гомологов $n-C_{19}-C_{23}$ может быть обусловлено микробиальным их образованием. Нефтяные УВ способствуют интенсификации биохимических процессов. Установлено, что в период гидрологической зимы активность нефтеокисляющих микроорганизмов достигает 57, а летом – 80 нг л/ч [41]. В частности после разлива нефти (район о. Баффин, Арктика) оказалось, что в составе алканов прибрежных осадков доминировали биогенные гомологи [42].

По содержанию полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) можно допустить, что донные осадки слабо загрязнены, так как сумма 3–6 кольчатых полиаренов в основном < 100 нг/г. Согласно маркерам, поступление в донные осадки пирогенных и нефтяных полиаренов происходит в одних и тех же районах, и между этими параметрами наблюдается значимая корреляция. Наши данные совпали с результатом мониторинга стойких органических загрязняющих соединений, в том числе и ПАУ, в осадках Белого моря. Повышенные их концентрации в поверхностном слое во время летней межени тяготеют к кутовой части Кандалакшского (2087 нг/г) и Двинского (230 нг/г) заливов [43]. Содержание бенз(а)пирена согласно классификации ЕРА соответствует II-ому классу, как незначительное (< 420 нг/г), в то время как концентрации бензфлуорантена, индопирена и бензперилена в отдельных случаях соответствовали IV классу – опасному загрязнению (700–4800 нг/г). Содержание других ПАУ соответствовало I и II уровням, за исключением бензоперилена в осадках Двинского залива. Согласно общей картине уровни ПАУ свидетельствовали в основном о незначительном загрязнении донных осадков.

Анализ донных осадков Арктических морей (Карского, Баренцева, Белого и др.) [44] показал, что с 1990 г. не произошло значительных изменений в концентрациях и составе УВ. При современных концентрациях нефтяных УВ и наиболее токсичных ПАУ в морских водах биологические эффекты отсутствуют либо проявляются в форме первичных (в основном обратимых) физико-биохимических реакций. Обусловлено это тем, что трансформация антропогенных УВ происходит достаточно быстро даже при низких температурах.

Таким образом, показано, что загрязнения, выносимые реками, оседают в основном в области маргинальных фильтров и не попадают в открытые морские акватории. Очевидно, поступление нефтяных и пирогенных УВ формирует повышенный углеводородный уровень в донных осадках, в основном, в приустьевых акваториях. Во время половодья происходило увеличение концентрации УВ в воде и донных осадках по сравнению с летней меженью.

Выводы

1. Сочетание условий среды и сурового климата Арктики приводят к особому ходу осадочного процесса, который на протяжении последних десятилетий изучен ИО РАН и назван ледовым типом седиментогенеза [2, 5]. Теория литогенеза отвергала существование такого типа осадконакопления [45], что приводило многих исследователей к ошибочным выводам. Морские геологические исследования проводились в Арктике на очень низком уровне.
2. За последние годы Лабораторией физико-геологических исследований разработана и внедрена в практику работ новая система исследований с помощью автоматических глубоководных обсерваторий, спутниковых данных, исследований микро- и наночастиц в водной толще, прямых определений вертикальных потоков вещества (и загрязнений) с помощью седиментационных ловушек разных систем, а также микростратиграфических исследований донных осадков полученных мультикорером.

Предваряющие исследования в Белом море (непрерывно на протяжении 15 лет – 5.5 тыс. суток непрерывных определений по многим параметрам) дали возможность создать новый подход. Это первые результаты непрерывных 15-летних наблюдений, в том числе под слоем льда и в полярную ночь. Полученные данные опубликованы в монографии «Система Белого моря» т. I-III и в ряде статей.

3. В целом это первая система непрерывных круглогодичных океанологических и геологических, биогеохимических исследований в 4-D системе.

4. Имеются все основания для того, чтобы рекомендовать эту систему ИО РАН для исследования морей Российской Арктики и, в первую очередь, для развертывания подводных обсерваторий по трассе Севморпути, а также на разрезах устья рек – бровка континентального склона.

5. Геохимические и биогеохимические исследования в морях, проведенные Лабораторией показали, что старая система мониторинга с приведением единиц ПДК непригодна для ледовой Арктики, находится в противоречии с данными фундаментальной науки.

6. Новая система биогеохимического мониторинга предусматривает непрерывное во времени изучение загрязнений всех внешних геосфер, которые взаимодействуют и, в конечном счете, оказываются на поверхности моря, а затем в донных осадках. Новая система биогеохимического мониторинга представляет возможность не только непрерывного во времени (а не точечного как раньше) получения проб глубоководных обсерваторий, но и изучение потоков загрязнений, векторов их распространения и градиентов.

7. Работа седиментационных обсерваторий в Арктике должна дополняться установкой седименто-геохимических обсерваторий в устьях крупных рек (в маргинальных их фильтрах), необходимо также несколько зональных аэрозольных обсерваторий на островах Арктики, изучение донных осадков озер и болот в Арктике и Субарктике.

8. Эти работы должны проводиться Российской академией наук, поскольку опыт ПДК-мониторинга показал, что его результаты подгоняются ведомствами под свои интересы и часто занижены.

9. В дальнейшем необходимо эту новую систему (усовершенствованную в ходе наших работ) распространить на всю Арктику, включая ее зарубежные части, поскольку границ для распространения загрязнений нет, идет трансграничный их перенос в генеральном направлении море Лаптевых – Северный полюс – Северная Атлантика (западное побережье Северной Америки, Исландия, Гренландия).

Трансграничный перенос аэрозолей из промышленных районов Европы идет через территорию Российской Субарктики, т.е. в направлении обратном ледовому, с запада на восток. Это подтверждает работа на протяжении четырех лет аэрозольной станции Лаборатории физико-геологических исследований ИО РАН в северной части Белого моря [15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.П. Лисицын. *Геология и геофизика*, 2010, **51 (1)**, 18-60.
2. А.Р. Lisitzin. *Sea-Ice and Iceberg Sedimentation in the Ocean. Recent and Past*. Berlin: Springer, 2002, 563 p.
3. А.П. Лисицын, Г.С. Харин, Е.А. Чернышева. *Океанология*, 2004, **44 (3)**, 440-456.
4. А.П. Лисицын, Г.С. Харин, Е.А. Чернышева. *Океанология*, 2004, **44 (4)**, 589-599.
5. А.П. Лисицын. *Ледовая седиментация в Мировом океане*. М.: Наука, 1994, 448 с.
6. А.Ю. Гуков. *Экосистема Сибирской полярной пустыни*. М.: Научный мир, 1999. 334 с.
7. Система Белого моря, I. Природная среда водосбора Белого моря. М.: Научный мир, 2010, 480 с.

8. Система Белого моря, **II**. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера. М.: Научный мир, 2012, 784 с.
9. Система Белого моря, **III**. Рассеянный осадочный материал гидросферы, микробные процессы и загрязнения. М.: Научный мир, 2013. 668 с.
10. В.В. Гордеев. Геохимия системы река–море. М.: ИП Матушкина И.И., 2012, 452 с.
11. Ю.А. Богданов, А.Ю. Леин, А.П. Лисицын. Полиметаллические руды в рифтах Срединно-Атлантического хребта (15–40° с.ш.): минералогия, геохимия, генезис. М.: ГЕОС, 2015 (в печати).
12. В.П. Шевченко, А.П. Лисицын, В.М. Купцов, Г. Ван-Малдерен, Ж.-М. Мартэн, Р. Ван-Грикен, В.В. Хуан. *Океанология*, 1999, **39** (1), 142-151.
13. В.П. Шевченко, А.П. Лисицын, А.А. Виноградова, В.В. Смирнов, В.В. Серова, Р. Штайн. *Оптика атмосферы и океана*, 2000, **13** (6–7), 551-576.
14. V. Shevchenko. *Berichte zur Polar- und Meeresforschung*, 2003, **464**, 149 p.
15. В.П. Шевченко, Д.П. Стародымова, А.А. Виноградова, А.П. Лисицын, В.И. Макаров, С.А. Попова, В.В. Сивонен, В.П. Сивонен. *Доклады Академии наук*, 2015, **461** (1), в печати.
16. P.K. Quinn, A. Stohl, A. Arneth, T. Berntsen, J.F. Burkhart, J. Christensen, M. Flanner, K. Kupiainen, H. Lihavainen, M. Shepherd, V. Shevchenko, H. Skov, V. Vestreng. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, 2011. 72 p.
17. В.В. Польшкин, М.В. Панченко, И.В. Грищенко, В.Б. Коробов, А.П. Лисицын, В.П. Шевченко. *Оптика атмосферы и океана*, 2008, **21** (10), 836–840.
18. В.С. Козлов, А.Б. Тихомиров, М.В. Панченко, В.П. Шмаргунов, В.В. Польшкин, С.М. Сакерин, А.П. Лисицын, В.П. Шевченко. *Оптика атмосферы и океана*, 2009, **22** (8), 767–776.
19. В.М. Копейкин, И.А. Репина, Е.И. Гречко, Б.И. Огородников. *Оптика атмосферы и океана*, 2010, 23 (6), 444–450.
20. А.А. Виноградова, А.О. Веремейчик. *Оптика атмосферы и океана*, 2013, 26 (6), 443–451.
21. A. Stohl, Z. Klimont, S. Eckhardt, K. Kupiainen, V.P. Shevchenko, V.M. Kopeikin, A.N. Novigatsky. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**, 8833–8855.
22. Р.Е. Власенков, А.П. Макштас. *Проблемы Арктики и Антарктики*, 2012, **2**, 63–71.
23. М.Д. Кравчишина, А.Ю. Леин, И.Н. Суханова, В.А. Артемьев, А.Н. Новигатский. *Океанология*, 2015, **55**, в печати.
24. А.П. Лисицын, М.Д. Кравчишина, О.В. Копелевич, В.И. Буренков, В.П. Шевченко, С.В. Вазюля, А.А. Ключиткин, А.Н. Новигатский, Н.В. Политова, А.С. Филиппов, С.В. Шеберстов. *Доклады Академии наук*, 2013, **453**, 4, 440–445.
25. В.И. Буренков, Ю.А. Гольдин, М.Д. Кравчишина. *Океанология*, 2010, **50**, 5, 842–849.
26. M. Kravchishina, A. Lein, V. Burenkov, A. Artem'ev. *Complex Interfaces Under Change: Sea – River – Groundwater – Lake*, 2014, **IAHS Publ. 365**, 42–48.
27. N.V. Politova, V.P. Shevchenko, M.D. Kravchishina. Seabed morphology of Arctic Russian shelf. New York: Nova Science Publishers, 2010, 73–85.
28. А.Ю. Леин, И.И. Русанов, Н.В. Пименов и др. *Геохимия*, 1996, **11**, 1027–1044.
29. L.L. Demina, M.D. Kravchishina. AGU Fall Meeting, 2014. Abstract № OS23D–1242.
30. R. Chester, M.J. Hughes. *Chem. Geol.*, 1967, **3**, 249–262.
31. Y. Kitano, R. Fujiyoshi. *Geochem. Journ.*, 1980, **14**, 122-123.
32. S.N. Luoma, G.W. Bryan. *Science of the Total Environment*, 1981, **17**, 165-196.
33. G.E. Millward, C. Rowley, T.K. Sands et al. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, **48**, 13-25.
34. А.Ю. Леин, М.В. Иванов. *Мировой океан*. М.: Научный мир, 2014, **2**, 165-173.

35. A.V. Evseev, A.P. Belousova, V.V. Ivanov et al. Environmental hot spots and impact zones of the Russian Arctic., ACOPS, GEF PDF-B Project No.GF/1100-99-13. Moscow, UNEP. 2000. 51 p.
36. А.П. Лисицын. Мировой океан. М.: Научный мир, 2014, **2**, 331-571.
37. M.V. Fernandes, M.A. Sicre. *Organic Geochemistry*, 2000, **31**, 363-374.
38. M. Dai, J.M. Martin, G. Cauvet. *Mar. Chem.*, 1995, **51**, 159-175.
39. И.А. Немировская. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Научный мир, 2013, 432 с.
40. I. Tolosa, S. Mora, M.R. Sheikholeslami et al. *Mar. Pol. Bul.*, 2004, **48**, 44-60.
41. В.В. Ильинский, М.Н. Семенов. Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М.: Научный мир, 2001, 364-375.
42. Z. Wang, M.F. Fingas. *Mar. Pol. Bul.*, 2003, **47 (3)**, 423-452.
43. Monitoring of hazardous substances in the White Sea and Pechora Sea: harmonization with OSPAR's Coordinated Environmental Monitoring Programme (CEMP) Tromso: Akvaplan-niva, 2011. 71 p.
44. AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme). AMAP Assessment 2002: Persistent organic pollution in the Arctic. Oslo: AMAP, 2007. 57 p.
45. Н.М. Страхов. *Литология и полезные ископаемые*, 1976, **6**, 3-20.