

На правах рукописи



Колтовская Екатерина Владимировна

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, СОСТАВ И ГЕНЕЗИС УГЛЕВОДОРОДОВ
ВО ВЗВЕСИ И ДОННЫХ ОСАДКАХ МОРЕЙ ЗАПАДНОЙ АРКТИКИ**

Специальность 1.6.17 – Океанология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук
Немировская Инна Абрамовна

Официальные оппоненты: **Опекунов Анатолий Юрьевич** доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии Института наук о Земле Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Коршенко Александр Николаевич кандидат биологических наук, заведующий Отделом мониторинга морской среды Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»

Защита состоится «__» _____ 2024 г. в ___ час. ___ мин. на заседании диссертационного совета 24.1.090.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: Нахимовский проспект, д. 36, г. Москва, 117997

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.ocean.ru/disser/> Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 года.

Ученый секретарь Диссертационного совета
Кандидат физико-математических наук
Соловьев Дмитрий Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность исследования. Интерес к изучению УВ в высокоширотных акваториях в значительной степени обусловлен высоким нефтегазоносным потенциалом арктического шельфа, который, по последним оценкам, превышает 100 млрд т в нефтяном эквиваленте [Каминский и др., 2016]. При этом на шельф Баренцева моря приходится 24% общемировых углеводородных запасов, на долю Карского моря – 48 %. В настоящее время, из-за растущего значения минеральных и биологических ресурсов океана, арктический регион превратился в центр международного внимания [Эрки, 2012; АМАР, 2017]. Антропогенное влияние на морские экосистемы в процессе добычи и использования природных ресурсов неизбежно влечет за собой риск загрязнения окружающей среды. Странами ООН определен перечень приоритетных веществ, загрязняющих морские акватории. Прежде всего, это нефть, нефтепродукты, основную массу которых составляют углеводороды (УВ), алифатические (АУВ) и полициклические ароматические (ПАУ).

Для разработки эффективных мер по борьбе с загрязнениями морей необходимо установить источники их поступления в морскую среду, физико-химические и механические свойства, пространственное распределение нефтяных соединений. Актуальность работы заключается в необходимости мониторинга за загрязнением морской экосистемы, а также в получении и интерпретации геохимических данных о трансформации и распределении нефтяных соединений в водах и донных осадках Карского, Баренцева и Норвежского морей, испытывающих наибольшую антропогенную нагрузку в связи с происходящей уже добычей и транспортировкой нефти. В частности, введение в строй ледостойкой морской нефтедобывающей платформы «Приразломная» и связанных с этим маршрутов

транспортировки нефти также должно сказаться на экологической ситуации этого района моря. Поэтому актуальность исследование УВ в экосистеме арктических морей не вызывает сомнений.

Наблюдаемые изменения состояния экосистем этих морей, связанные с различными гидрометеорологическими и биогидрохимическими условиями, а также климатической изменчивостью, добычей нефти на шельфе, интенсификацией судоходства определяют актуальность и необходимость дальнейшего разностороннего исследования миграции и аккумуляции различных углеводородных классов. При этом необходимо получение новых результатов и разработки новых методов исследования антропогенных и природных УВ, что особенно важно в связи с климатическими изменениями, происходящими в последние годы. Полученные результаты должны стать основой для создания системы мониторинга нового поколения, определяющего не только концентрации УВ разного генезиса, но и их источники, а также процессы их трансформации.

Основной целью работы является выявление пространственных закономерностей распределения, изменчивости состава, а также генезиса УВ в составе взвешенного вещества и донных осадков различных районов Карского, Баренцева и Норвежского морей.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- Обработка и анализ проб взвеси и донных осадков экспедиционного материала;
- Установление закономерностей пространственно-временного распределения УВ, а также состава АУВ и ПАУ во взвеси поверхностных вод и в донных осадках;

- Определение факторов, влияющих на распределение и генезис УВ в рассеянном осадочном веществе и донных осадках арктических морей;
- Выявление генезиса УВ в исследованных районах с помощью соотношения маркеров в их составе и статистических методов обработки результатов.

Научная новизна работы. Получены и проанализированы новые данные по содержанию и составу АУВ и ПАУ во взвеси и донных осадках Карского, Баренцева и Норвежского морей за период с 2018 по 2022 гг. Впервые были измерены потоки УВ в осадочном материале седиментационных ловушек в Карском море. Полученные результаты позволили установить, что природные процессы, такие, как биогенная трансформация органического вещества, очаги флюидоразгрузки в верхнем слое донных осадков, биосинтез живыми организмами, деградация автохтонного материала, а также ледовый разнос оказывают значительно большее влияние на распределение УВ, чем антропогенные. Для репрезентативной оценки загрязненности акваторий использовали статистическую обработку данных по составу УВ: расчет индикаторных соотношений, факторный и кластерный анализы.

Методы исследований и степень достоверности. В работе использовали методы, применяемые для изучения природных [Беляев, Поняев, 2015; Методы, 1988] и антропогенных УВ, в том числе арбитражные в РФ [Коршенко, 2022; Опекунов и др., 2015; Справочники МОК/ВМО, 1984], при контроле чистоты отбора и подготовки проб, с помощью современного аналитического оборудования. Качество результатов исследования обеспечивается статистически значимым количеством проб, контролем точности химических анализов с помощью стандартных образцов, сравнением с литературными

данными, в том числе зарубежными, апробацией результатов на различных конференциях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Выявлена высокая корреляция концентраций УВ во взвеси с общей концентрацией взвеси ($r^2=0,6-0,9$, $n=55$) и ее биогенной составляющей в поверхностных водах Карского, Баренцева и Норвежского морей. В зонах с высокой концентрацией УВ (Кольский залив и Карские ворота) эта закономерность нарушалась. Уменьшение продуктивности вод с юга на север в Баренцевом и с запада на восток в Карском морях вызывает также уменьшение концентраций АУВ.

2. Впервые были измерены потоки УВ в осадочном материале Карского моря по данным седиментационных ловушек. Изменчивость потоков УВ ($0,08-1,1$ мг/м²/сут) в водной толще происходит в меньшей степени по сравнению с изменчивостью общих потоков осадочного вещества ($76-12594$ мг/м²/сут) и потоков органического углерода ($C_{орг}$): $0,5-671$ мгС/м²/сут. С глубиной уменьшение биогенной составляющей в потоке осадочного вещества вызывает увеличение терригенных алканов в составе АУВ.

3. Концентрации УВ в донных осадках Карского, Баренцева и Норвежского морей зависят не только от их гранулометрического состава, но и от геохимической обстановки и диффузионных потоков из продуктивных горизонтов. Примесь грубозернистых частиц в осадке уменьшает аккумуляцию УВ в 1,5–2 раза по сравнению с мелкодисперсными осадками. В толще осадков разгрузка флюидов приводит к образованию автохтонных низкомолекулярных алканов, а также низкомолекулярных ПАУ, в особенности – нафталинов.

4. Согласно оценке загрязненности морских акваторий ПАУ, повышенные величины расчетных индексов загрязненности (FFPI) и уровня токсичности (TEQ) приурочены к местам их природного поступления и обусловленных

активностью фитопланктона, величиной материкового стока, флюидной разгрузки в зонах естественных газопроявлений. Для определения генезиса ПАУ необходимо использовать не только их концентрацию, состав и статистические методы анализа, но и учитывать гидролого-геохимические условия района. Рассчитанные индексы рекомендуется использовать только для районов с непосредственным поступлением загрязняющих веществ.

Научная и практическая значимость работы. Полученные результаты могут быть использованы для решения как фундаментальной проблемы поведения УВ - постоянных компонентов органического вещества (ОВ) [Вернадский, 2001], так и прикладных целей геоэкологии в этих важных для экономического развития страны регионах. Умение корректно количественно оценивать загрязненность морских акваторий особенно в районах нефтедобычи, воздействие таких изменений на динамику морских экосистем – ключевой фактор понимания экологических проблем окружающей среды. Выявленные региональные особенности распределения и поступления концентраций УВ, помимо фундаментального значения, могут использоваться при экологическом мониторинге морских акваторий в условиях антропогенного воздействия. Данные о местонахождении природных очагов поступлений УВ из донных отложений могут служить геохимическим методом поиска новых нефтегазоносных месторождений.

Личный вклад автора работы. Автор диссертационной работы принимала непосредственное участие в экспедиции 2018 г., где занималась отбором проб взвеси на станциях и в седиментационных ловушках, первичной обработкой и подготовкой к последующим лабораторным исследованиям в судовой лаборатории. В Аналитической лаборатории ИО РАН автором диссертационной работы выполнен геохимический анализ проб для определения УВ, их состава во взвеси методом электронной микроскопии, а

также дальнейшая математическая обработка, визуализация и интерпретация полученных результатов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы и сопутствующие исследования были представлены на различных международных и российских конференциях: VIII Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образование» (MARESEDU) (Москва, 2019, 2023 гг.); Международные геолого-геофизические конференции и выставки: Современные технологии изучения и освоения недр Евразии «ГеоЕвразия» (Москва, 2018–2019 гг.); XXIII, XXIV Международные конференции (Школы) по морской геологии (Москва, 2019, 2020 гг.); III, IV, V, VI Всероссийские научные конференции молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (Москва, Санкт-Петербург, Калининград, 2018–2023 гг.).

Публикации. Материалы диссертационной работы полностью изложены в работах, опубликованных соискателем. По теме диссертации опубликованы 4 статьи в научных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, Web of Science, Scopus и 6 тезисов докладов на научных конференциях.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключения, списка использованных источников, Приложения. Объем работы составляет 193 страницы, в том числе 50 рисунков и 11 таблиц. Библиографический список включает в себя 213 наименований, в том числе 83 на иностранном языке. В Приложении содержится 12 таблиц и 2 рисунка.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю д.г.-м.н. И.А. Немировской, без которой работа бы не состоялась. Автор благодарит коллег Аналитической лаборатории и Лаборатории физико-геологических исследований за помощь в обработке проб и анализе материала: А.В. Храмцову, А.Г. Боева, Е.О. Золотых, И.С. Халикова. За помощь, оказанную в ходе экспедиций, автор выражает благодарность А.В. Булохову.

Автор искренне благодарен за ценные знания на разных этапах становления в науке М.Д. Кравчишиной, А.А. Клювиткину, А.В. Леонову, а также академику РАН М.В. Флинту. Автор также ценит помощь Л.Л. Деминой в написании работы. Автор благодарит своего первого научного руководителя на кафедре океанологии МГУ им. М.В. Ломоносова А.В. Полякову и преподавателей академика РАН С.А. Добролюбова, А.Н. Пантюлина и А.Н. Демидова за полученные знания в области океанологии. Автор благодарен коллеге и мужу Борисенко Г.В. за всестороннюю поддержку и помощь в написании работы.

Основное содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи, содержится общая характеристика работы: положения, выносимые на защиту, новизна, достоверность, вклад автора, апробация, список публикаций.

Глава 1 посвящена описанию углеводородных классов, изучаемых в работе: АУВ и ПАУ. Их химические свойства и особенности молекулярного строения описаны в **разделе 1.1**. АУВ находятся в составе нефти и природного газа, составляя их основную часть: как правило, их содержание в нефтях в среднем составляет 20-80%, АУВ также являются продуктом биологического синтеза фито- и зоопланктоном. Их структура имеет вид линейной цепочки [Травень, 2013]. ПАУ – это циклические соединения, представляющие собой цепочку 2 и более бензольных колец. Обычно нефти содержат 15-20% ПАУ, а в некоторых нефтях их содержание может достигать 35%. Согласно принципу присоединения бензольных колец [Король, Лысюк, 1979], ПАУ делятся на две большие группы: ката-конденсированные, образованные путем линейного присоединения бензольных колец в более «мягких» температурных условиях

(нафталин, антрацен), и пери-конденсированные, образованные в высокотемпературных процессах путем ангулярного присоединения колец к нафталиновым, антраценовым и пр. структурам [Ровинский, 1988].

В **разделе 1.2** описаны различные источники поступления УВ в морскую среду: биогенные (1.2.1), петрогенные (1.2.2), пирогенные (1.2.3) и антропогенные (1.2.4). Главная трудность при интерпретации данных о содержании нефтяных УВ в морской среде, особенно при низких (фоновых) уровнях, характерных для открытых морских вод, связана с сосуществованием антропогенных и природных источников поступления нефти и нефтяных УВ в воду. К их числу относятся: процессы жизнедеятельности и метаболизма морских организмов, которые сопровождаются биосинтезом и выделением экзометаболитов в морскую среду. Такие УВ называются автохтонными. Вынос рек, а также поступление из всех прибрежных источников, является источником аллохтонных УВ в морской среде. Петрогенные УВ поступают в акваторию с восходящими потоками и молекулярной диффузией из недр донных отложений. В высокотемпературных процессах образуются пирогенные УВ.

В **Главе 2** представлено описание гидрологических и ледовых условий, климата, рельефа дна, течений и водных масс, стока рек, изменчивости биогидрохимических параметров, осадочного вещества и верхнего слоя донных осадков Карского, Баренцева и Норвежского морей. В **разделах 2.1-2.3** описаны особенности вышеуказанных параметров для этих морей.

Глава 3 содержит обширную информацию о проведенных ранее исследованиях УВ в высоких широтах. В **разделе 3.1** описаны результаты исследований концентраций и источников УВ во взвеси и донных осадках арктического региона. **Раздел 3.2** посвящен исследованиям антропогенных УВ в Карском, Баренцевом и Норвежском морях, а **раздел 3.3** – природным

источникам УВ в этих морях. В **разделе 3.4** и **3.5** описываются ПАУ – как наиболее устойчивый класс УВ, обладающий высокой токсичностью и канцерогенностью. Приводятся литературные данные о содержании ПАУ в донных осадках Карского, Баренцева и Норвежского морей.

В **Главе 4** описан фактический материал, используемый в диссертации (**раздел 4.1**), процесс отбора проб (**раздел 4.2**), пробоподготовки (**раздел 4.3**) и методологии лабораторных анализов углеводородных классов (**раздел 4.4**). Существенным отличием аналитической схемы экстракции и анализа углеводородных фракций являлось использование единой схемы для извлечения УВ из разных объектов, сочетание как интегральных, так и дифференциальных методов для их анализа. При этом, УВ определяют не только методами, используемыми при мониторинге нефтяных углеводородов [Коршенко, 2023], но и проводят их изучение в составе ОВ, фракцией которого они являются. В **разделе 4.5** описан метод определения в составе взвеси доли литогенного и биогенного вещества, аморфного кремнезема и карбоната кальция.

В **параграфе 4.4.1** приводится описание измерения концентраций УВ ИК- и флуоресцентным методами. В **параграфах 4.4.2** и **4.4.4** описаны методики определения состава алканов и ПАУ методом ВЭЖХ. В **параграфах 4.4.3** и **4.4.5** описаны статистические подходы к определению генезиса АУВ и ПАУ: расчет индикаторные соотношения, расчет показателей загрязнения ископаемым топливом (FFPI) и коэффициент токсичности ПАУ (TEQ), факторный анализ.

Глава 5 посвящена исследованию изменчивости концентрации и состава УВ во взвеси и донных осадках Карского моря в зависимости от гидрологических, биохимических и литологических особенностей акватории по

данным 2018 и 2022 гг. В **разделе 5.1** описаны закономерности распределения АУВ в поверхностной взвеси (рис.1). Установлено, что распределение АУВ во взвешенном веществе в большей степени зависит от биологической составляющей и гидрологических условий.

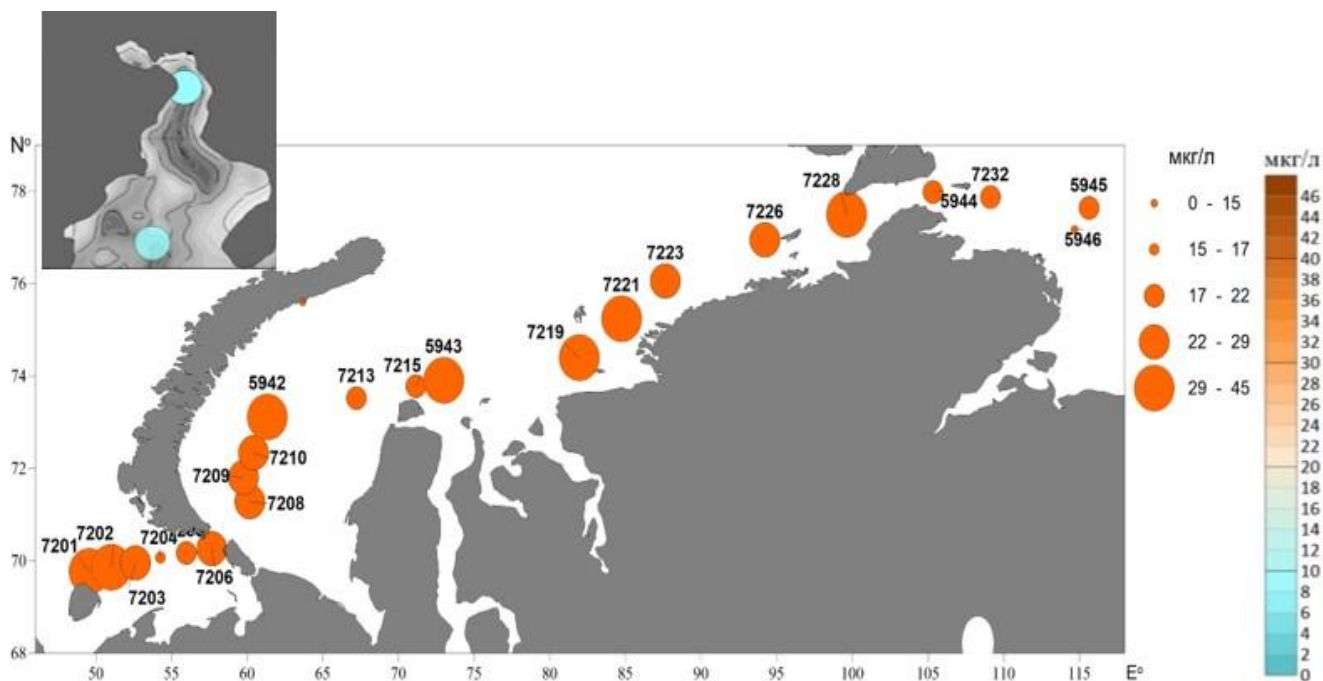


Рисунок 1. Распределение АУВ во взвешенном веществе поверхностного слоя Карского моря в 2018 г. На врезке – залив Благополучия.

Максимумы (до 38-46 мкг/л) приурочены к районам, где отмечается высокая активность биоты и высокое содержание S_{org} : устьям рек и местам усиления адвективных потоков атлантических вод, а также к центру циклонической завихренности (рис.2).

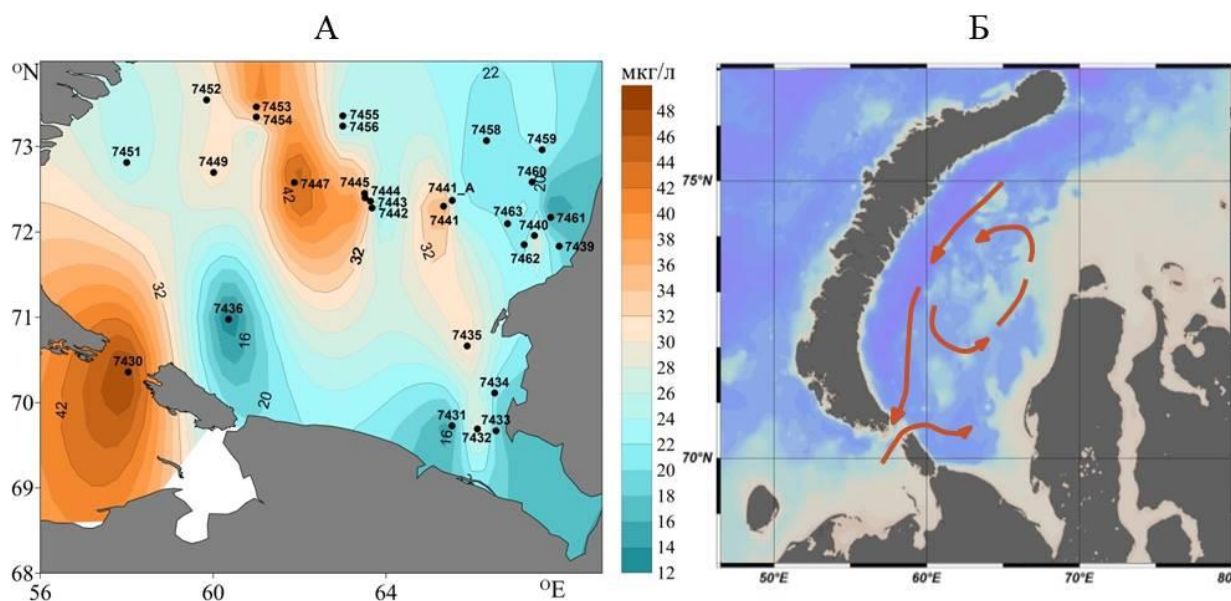


Рисунок 2. Распределение АУВ во взвешенном веществе поверхностного слоя Карского моря в 2022 г. (А) и циклонический вихрь в поверхностных водах Карского моря [Моря СССР; Артемьев и др., 2021] (Б)

В водной толще максимумы АУВ наблюдаются в слое пикноклина при устойчивой стратификации вод (рис. 3).

В разделе 5.2 приведены полученные впервые данные о потоках УВ в осадочном материале, собранном седиментационными ловушками. В параграфах 5.2.1 и 5.2.2 описан состав осадочного вещества по расчетным данным и данным электронной микроскопии, величины общих потоков и потоков $C_{орг}$, дано сравнение полученных данных с литературными. В составе осадочного вещества глубоководной части моря и области влияния обских вод преобладала биогенная составляющая, представленная в основном клетками диатомовых водорослей. В заливе Благополучия арх. Новая Земля осадочное вещество было представлено терригенным материалом преимущественно алюмосиликатного состава.

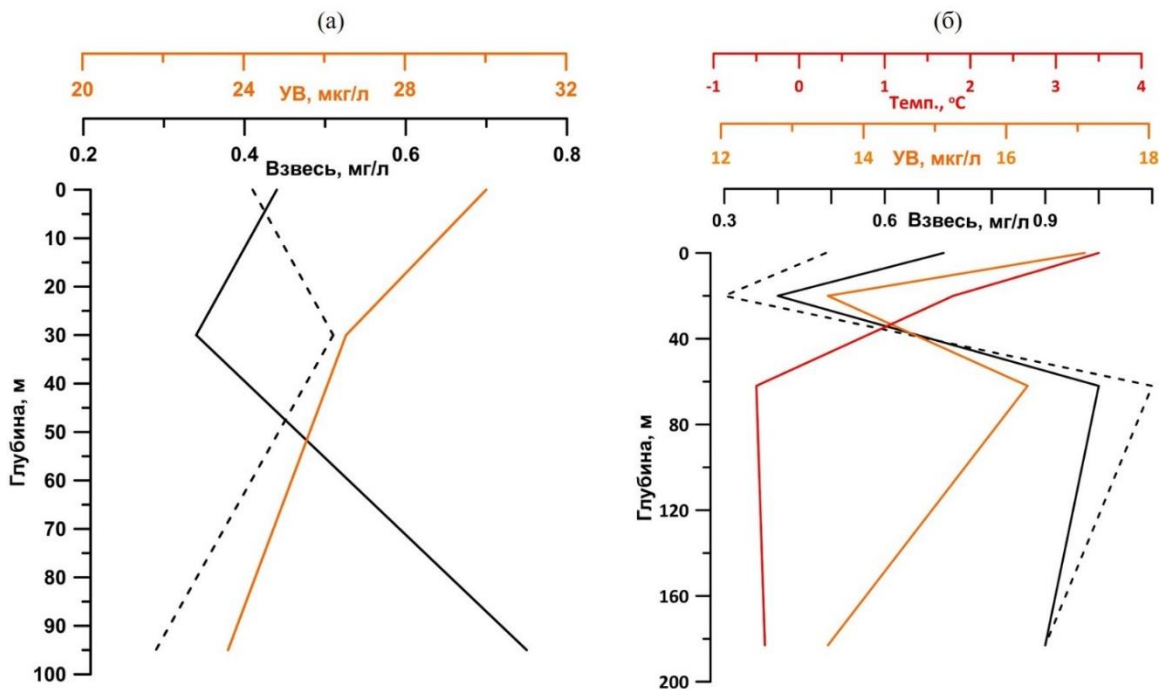


Рисунок 3. Изменчивость концентраций УВ и взвеси (сплошной линией – при постановке ловушки, пунктиром – после снятия ловушки) в глубоководной части Карского моря (а) и в проливе Вилькицкого (б)

Данные по потокам УВ и изменчивости их состава приведены в параграфах 5.2.3 и 5.2.4. Было установлено, что на станциях Карского шельфа распределение потоков АУВ в водной толще в общих чертах совпадало с распределением общих потоков осадочного материала и потоков $C_{\text{орг}}$ (рис. 4А), при этом изменчивость АУВ проявлялась в меньшей степени и была обусловлена уменьшением биогенной составляющей с глубиной. Состав алканов позволяет говорить о биогенной природе АУВ в составе взвешенного вещества: в составе материала седиментационных ловушек преобладают маркеры автохтонного происхождения (фитопланктона), а в нижележащих горизонтах – микробиологическими процессами.

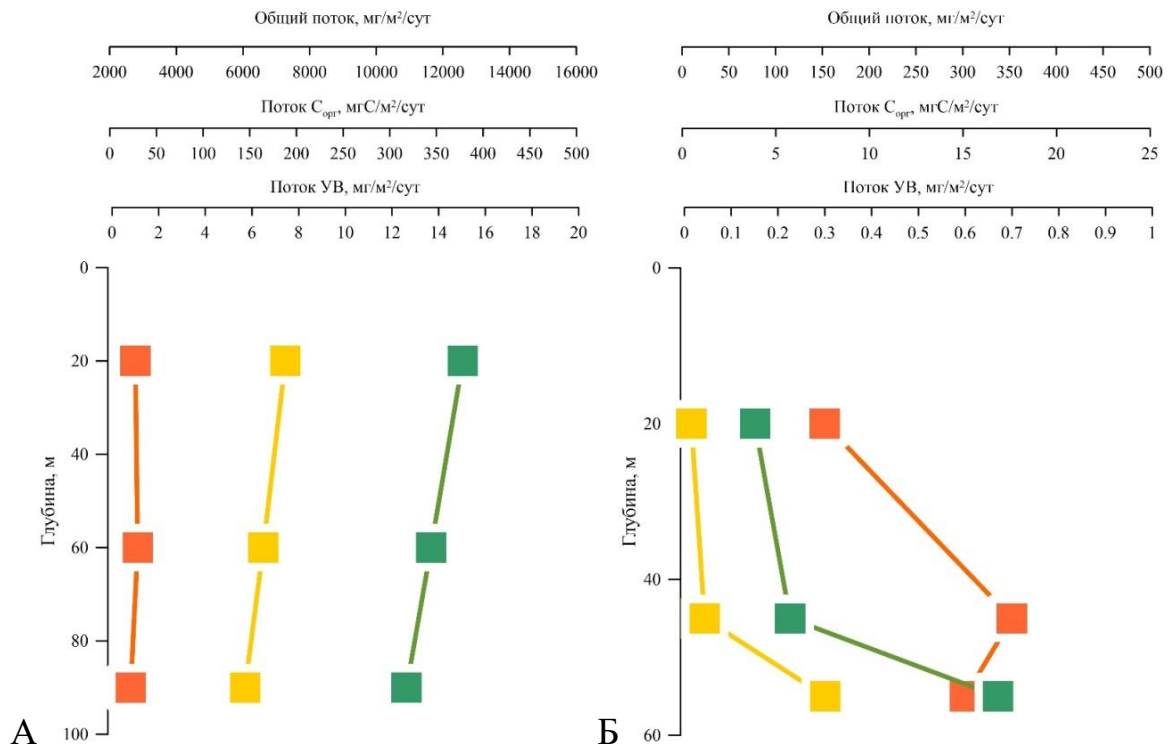


Рисунок 4. Величины общих потоков, потока $C_{орг}$ и потоков АУВ в зал. Благополучия арх. Новой Земли и в зоне метанового сипа (Б)

Также установлено, что поступление УВ из донных отложений посредством естественных газопроявлений в области метановых сипов западного шельфа моря Лаптевых приводит к увеличению их потоков в придонном и на промежуточном горизонтах (рис.4Б).

Раздел 5.3 посвящен результатам исследований содержания УВ в верхнем слое донных осадков (0–36 см). Установлено, что в южной и центральной частях Карского моря наблюдается монотонное уменьшение концентраций УВ в толще осадка. Увеличение АУВ в нижних горизонтах колонки происходит на станциях с естественными газопроявлениями в осадочной толще (метановых сипах) и свидетельствует об их образовании непосредственно в осадочной толще. Установлено, что метановые сипы являются источниками не только АУВ, но и ПАУ.

Глава 6 посвящена исследованиям УВ во взвеси и донных осадках в Баренцевом и Норвежском морях. **Разделы 6.1** и **6.2** включают в себя анализ концентрации и состава АУВ во взвеси и верхнем слое донных осадков (0–34 см) по данным 2019 и 2020 гг. В ходе исследования установлено, что в поверхностных водах в летний сезон высокое содержание АУВ (до 62 мкг/л) приурочено к местам высокой биомассы кокколитофорид. Рост концентраций углеводов (до 56 мкг/л) на фоне роста содержания $C_{\text{орг}}$ в придонном горизонте происходит при взмучивании нефелоидного слоя. В Норвежском море (в поверхностных водах) концентрации АУВ соразмеряемы с их величинами в южной части Баренцева моря (17–31 мкг/л). Высокие концентрации (до 58 мкг/л) отмечаются у восточного побережья арх. Шпицберген в местах ледовой разгрузки.

Раздел 6.3 посвящен исследованиям ПАУ в донных осадках Баренцева и Норвежского морей по данным 2019–2021 гг. Установлен высокий диапазон изменчивости концентраций ПАУ в осадках флуоресцентным методом (2–17000 нг/г) (рис.5). Эти данные приводятся в **параграфе 6.3.1**.

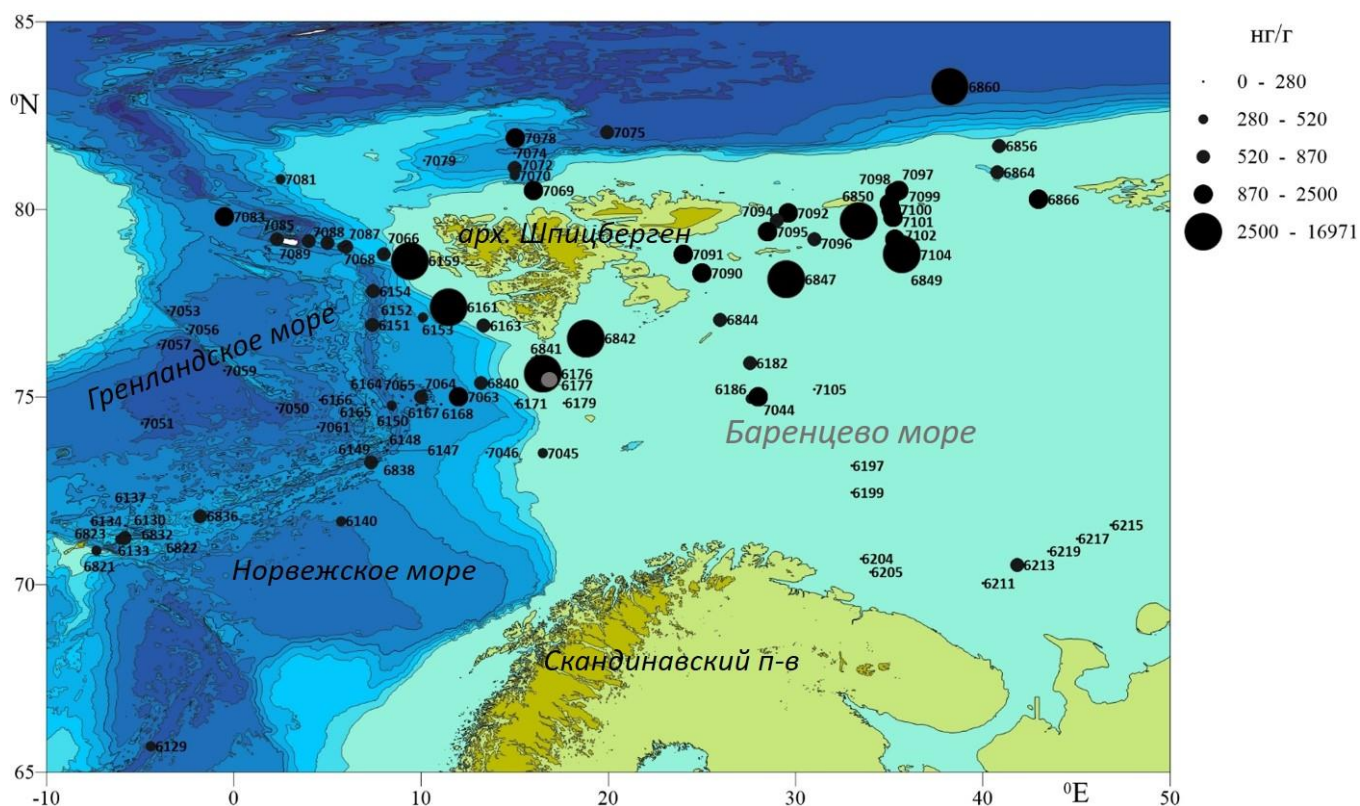


Рисунок 5. Содержание ПАУ в поверхностном слое донных осадков в 2019–2021 гг. по данным флуоресцентного анализа

В параграфе 6.3.2 описан результат измерений состава ПАУ методом ВЭЖХ. Наиболее распространенными оказываются 2-3-кольчатые, катаконденсированные полиарены: НАФ, 1,2-МеНАФ, ФЕН, а среди 4-6-кольчатых, пери-конденсированных ПАУ доминировали ФЛТ, ПР, БаА, БеП, ХР, БаП (рис. 6).

Происхождение ПАУ - пирогенное или нефтяное - было установлено на основании расчёта основных диагностических соотношений. Наиболее показательными среди них оказались соотношения, рассчитанные для одной молекулярной массы [Хаустов, Редина, 2017]: ФЕН/АНТ; ФЛТ/(ФЛТ + ПР); ИНД/(ИНД + БПЛ). Большая часть маркеров указывает на нефтяное происхождение полиаренов в донных осадках, которое может иметь как

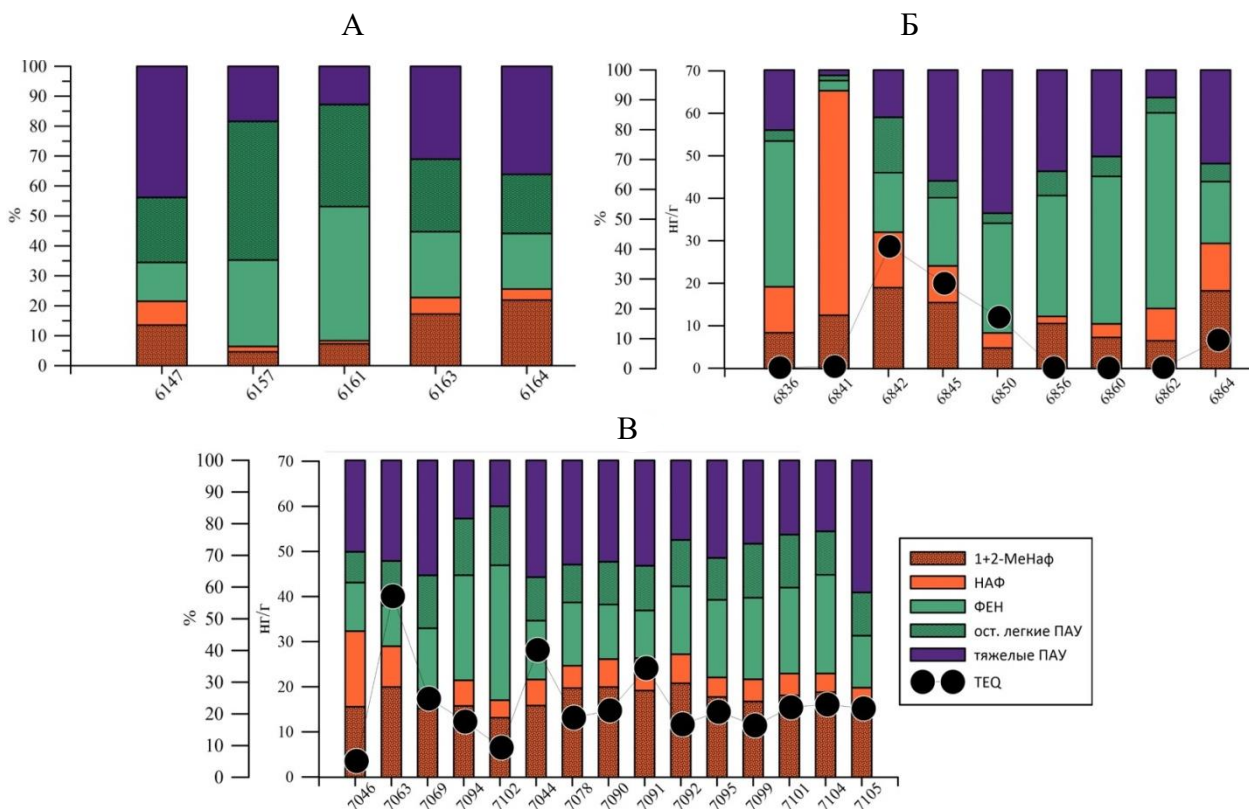


Рисунок 6. Состав ПАУ в поверхностных осадках на отдельных станциях в 2019 (А), 2020 (Б), и 2021 (В). На гистограмме показаны доли ФЕН, НАФ, 1,2-МеНАФ, суммы оставшихся легких ПАУ – АЦН, ФЛН, АНТ, тяжелых 4-6 кольчатых ПАУ входят: ФЛТ, ПР, БаА, ХР, ВбФ, БкФ, БаП, ВеП, ИНП, ДВА, БПЛ. Точками обозначены величина индекса токсичности –ТЕQ

антропогенный, так и природный флюидный генезис. Обогащение менее стабильными ПАУ особенно характерно для осадков прибрежных районов арх. Шпицберген. Их антропогенный характер на исследованных участках также представляется маловероятным. Здесь обогащение полиаренами происходит благодаря поступлению из углистых донных отложений [АМАР, 2017].

Преобладающими источниками ПАУ по результатам наших исследований являются природные процессы: эрозия донных отложений, поступление из

осадочной толщине и их образование в водной толще, а не эоловые потоки. Холодные метановые сипы, газовые факелы и покмарки являются источниками не только УВ метанового ряда, но и ПАУ.

Расчеты индексов загрязненности (FFPI) и токсичности показали, что значения FFPI изменялись в диапазоне 21–95%. Наибольшие значения были приурочены к Стурфиорду и южному шельфу Шпицбергена – 60–95%. Суммарный уровень токсичности (TEQ), согласно нашим расчетам, изменялся в пределах 0.1–53 нг/г (среднее значение – 14 нг/г) и достигал наиболее высоких значений в поверхностных отложениях западного шельфа арх. Шпицбергена, Стурфиорда, района Шпицбергенской банки и о-ва Медвежий. При этом, в этих областях, согласно индикаторным соотношениям ФЕН/АНТ, ПАУ формируются в условиях эрозии углистых осадков и диффузии из нижележащих слоев.

По полученным данным концентраций индивидуальных ПАУ в Баренцевом и Норвежском морях был проведен факторный и кластерный анализы, результат и интерпретация которых описаны в **разделе 6.4**. Значения факторных нагрузок методом главных компонент, показывает, что концентрация является наиболее значимой характеристикой слоев донных осадков для ПАУ. Метод кластеризации К-средних позволил сгруппировать станции и горизонты донных осадков в 4 наиболее значимых кластера, имеющие свои характерные особенности распределения ПАУ. Так, например в кластер 1 (рис. 7) вошли 8 проб, приуроченных к верхнему слою донных осадков (0–2 см) станций Норвежского моря и района о-ва Белый. Этот кластер характеризуется преобладанием фенантрена в составе, несмотря на различные порядки концентраций ПАУ в этих пробах. Кластер 2 (рис. 8) включает в себя 23 измерения ПАУ в зонах естественных газопроявлений, где преобладают наиболее распространенные в осадках НАФ, 1-2-МеНАФ и ФЕН с АНТР, как наиболее часто встречающиеся природные ПАУ.

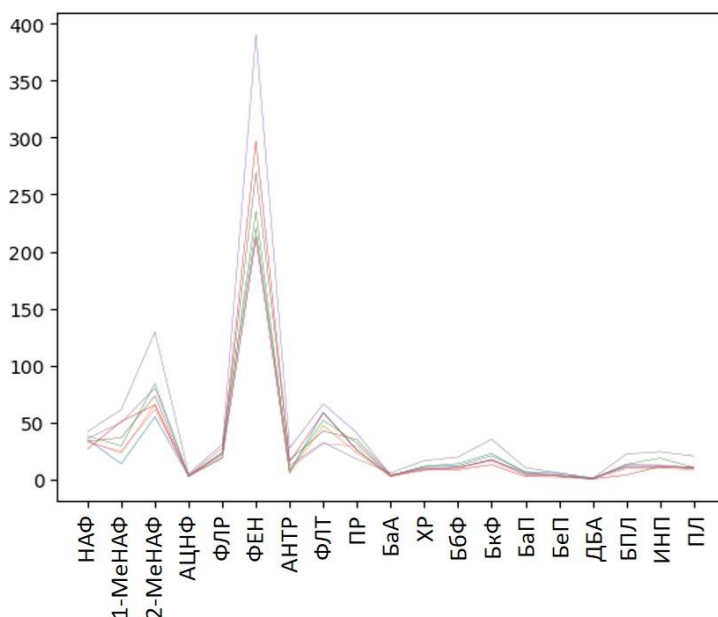


Рисунок 7. Группировки ПАУ по результатам кластерного анализа индивидуальных соединений, рассчитанного для массива данных 2019-2021 гг.

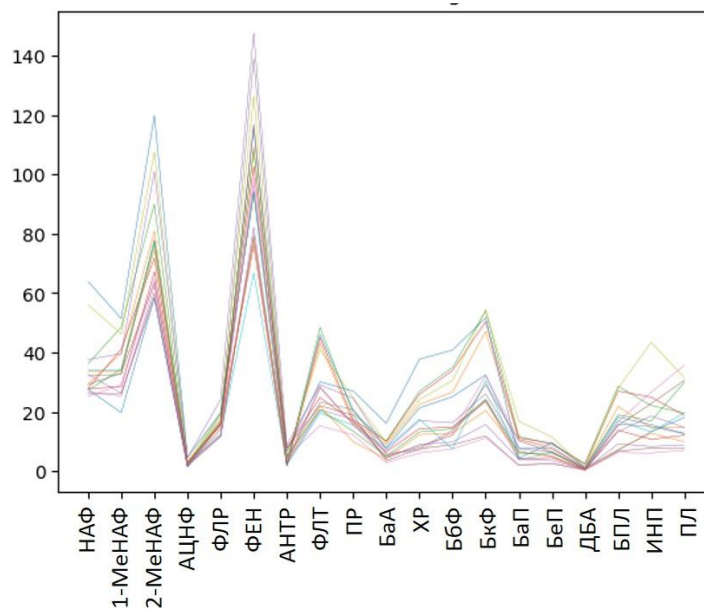


Рисунок 8. Группировки ПАУ по результатам кластерного анализа индивидуальных соединений, рассчитанного для массива данных 2019-2021 гг.

(кластер 2)

Использованный статистический анализ в различных районах позволил выделить характерные типы их распределения. Показано, что на сравнительно небольшом расстоянии от континента состав и концентрация ПАУ заметно меняются, что объясняется различными источниками поступления УВ в верхний слой донных осадков данной акватории. Однако, для расширения информационного потенциала ПАУ, статистический метод исследования стоит применять в сочетании с литолого-геохимическими данными.

В **Заключении** приведены основные результаты работы:

1. Распределение УВ в различных районах Карского, Баренцева и Норвежского морей обусловлены в основном гидрологическими условиями вод, и как следствие – продуктивностью водных масс, общей концентрацией взвеси и ее биогенной составляющей, а также содержанием органического углерода. С глубиной в отдельных случаях происходит рост их концентраций при взмучивании придонными течениями нефеловидного слоя
2. Повышенные концентрации АУВ (30–40 мкг/л) характерны для юго-западной части Баренцева моря и при подходе к Карским воротам. Наиболее высокие концентрации АУВ (53–62 мкг/л) приурочены к району кокколитофоридного цветения, то есть природные процессы могут формировать высокие уровни УВ, соизмеримые с ПДК для нефтяных УВ 50 мкг/л.
3. Различия потоков АУВ в седиментационных ловушках Карского моря обусловлены изменением потока осадочного вещества, а также стратификацией вод. Наиболее интенсивное осаждение АУВ в составе осадочного вещества наблюдается в заливе Благополучия Новой Земли, где происходит уменьшение их потоков от поверхностного слоя к придонному, а также в зоне выноса р. Обь. С глубиной доля биогенной

компоненты уменьшается из-за разрушения клеток фитопланктона и снижения общей биологической активности ниже слоя пикноклина, что отражается также на составе алканов.

4. В донных отложениях арктического шельфа распределение УВ зависит не только от условий седиментации и гранулометрического состава осадков, но и от окислительно-восстановительных условий в осадочной толще и молекулярной диффузии УВ из продуктивных горизонтов.
5. Влияние флюидных потоков из донных осадков проявляется, как в составе АУВ, так и ПАУ. Для определения генезиса УВ необходимо использовать не только их концентрацию, состав и статистические методы анализа, но и учитывать гидролого-геохимические условия района. Поэтому рассчитанные индексы FFPI (индекс загрязнения) и TEQ (индекс токсичности) рекомендуется применять только для районов с непосредственным поступлением загрязняющих веществ.
6. В противоположность АУВ наиболее высокие концентрации ПАУ в донных осадках Баренцева моря приурочены к акватории Шпицбергена, где доминировали в их составе алкилированные гомологи НАФ и ФЕН, что вызвано эрозией угольных отложений, то есть природными процессами в осадочной толще.
7. УВ, поступающие из антропогенных и природных источников, подвергаются в морской среде сходным процессам трансформации, поэтому в составе алканов практически не обнаружены нефтяные гомологи. Антропогенные УВ повышают их содержание в воде и донных осадках, создавая современный углеводородный фон. В настоящее время антропогенные поступления в изученных акваториях Карского, Баренцева и Норвежского морей носят подчиненный характер по сравнению с природными.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

1. **Koltovskaya E.V.**, Nemirovskaya I.A. Concentration and composition of polycyclic aromatic hydrocarbons in bottom sediments of the Barents and Norwegian seas // *Oceanology*. – 2023. – Vol. 63. M– Suppl. 1. – P. S144–S155.
2. **Koltovskaya E.V.**, Nemirovskaya I.A. Hydrocarbons and suspended matter fluxes in the Kara and Laptev seas // *Water*. – 2022. – V. 14. – № 14. – 2278.
3. **Колтовская Е.В.**, Немировская И.А. Распределение углеводородов и взвешенного вещества в морях Карском и Лаптевых в августе–сентябре 2018 года в период летней межени // *Вестник Московского университета*. – 2022. – Серия 5. – География. – № 1. – С. 81–94.
4. Немировская И.А., Храмцова А.В., **Колтовская Е.В.**, Халиков И.С., Соломатина А.С. Углеводороды в воде и осадках Норвежского и Баренцева морей // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. – 2021. – № 4. – С. 94–107.

Другие публикации:

5. **Koltovskaya E.V.**, Nemirovskaya I.A. Features of the behavior of oil hydrocarbons in the Barents Sea in 2019–2020 // *Complex Investigation of the World Ocean (CIWO-2023)*. – P. 303–308
6. **Колтовская Е.В.**, Немировская И.А. Нефтяные углеводороды в Баренцевом, Карском и Лаптевых морях в 2016–2020 гг. // *Сборник тезисов VII Всероссийской конференции молодых ученых «КИМО-2023»*, 15-22 мая 2023 г., Санкт-Петербург: Своё издательство, 2023. — С. 300–302. ISBN 978-5-4386-2269-7

7. **Колтовская Е.В.**, Немировская И.А., Храмцова А.В. Распределение углеводородов в Баренцевом и Норвежском морях // Сборник тезисов VI Всероссийской конференции молодых ученых «КИМО-2021», Москва: ИО РАН, 2021. – С. 382–383.
8. **Колтовская Е.В.**, Ключиткин А.А. Исследования потоков осадочного вещества на многолетнем транскеаническом разрезе в Субполярной Атлантике // Сборник тезисов V Всероссийской конференции молодых ученых «КИМО-2019», Севастополь: МГИ РАН, 2019. – С. 282–283.
9. **Колтовская Е.В.**, Немировская И.А. Углеводороды поверхностных вод на трансарктическим разрезе // Сборник тезисов Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия 2019. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии». Тверь: ООО «ПолиПРЕСС». – 2019. – С. 902–907.
10. **Колтовская Е.В.**, Немировская И.А. Поведение углеводородов и осадочного вещества в морях Российской Арктики. // Сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование MARESEDU-2019» Том II. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020. – С. 190–194.