

На правах рукописи



Марчук Екатерина Артемовна

**РОЛЬ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В МОДУЛЯЦИИ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛО- И ГАЗООБМЕНА МЕЖДУ АТМОСФЕРОЙ И
ОКЕАНОМ**

1.6.18 - Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва - 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном учреждении науки Институте физики атмосферы имени А.М. Обухова Российской академии наук (ИФА РАН).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Репина Ирина Анатольевна

Официальные оппоненты: **Баханов Виктор Владимирович**,
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной
физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»,
заведующий лабораторией

Ермаков Дмитрий Михайлович,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской академии наук,
ведущий научный сотрудник, заведующий отделом

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук

Защита состоится 24 декабря 2026 года в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 002.096.XX (24.1.130.01) в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук по адресу: 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3 стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФА им. А.М. Обухова РАН и на официальном сайте Института: <https://ifaran.ru/ru/about/dissertations>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 119017, Москва, Пыжевский пер., 3, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета Д002.096.XX (24.1.130.01) и в электронном виде e-mail: a.chernokulsky@ifaran.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 002.096.XX (24.1.130.01)
кандидат физико-математических наук



А. В. Чернокульский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию влияния внутренних волн на процессы **тепло- и газообмена между атмосферой и океаном** и механизма возникновения пространственно-временной модуляции обменных процессов.

Актуальность исследования. Актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью параметризации влияния волновых процессов в океане и атмосфере на турбулентные потоки тепла, импульса и газовых примесей в численных моделях прогноза погоды и изменений климата.

Внутренние волны способствуют вертикальному перемешиванию океана, а также горизонтальному и вертикальному переносу энергии и импульса в нем, тем самым оказывая влияние на динамику и температурную стратификацию океана в целом. Таким образом, их изучение имеет важное прикладное значение, например, для подводного мореплавания и решения задач подводной акустики [Коняев, Сабинин, 1992] (эту и последующие ссылки смотри в списке литературы диссертации). Они распространяются во всей толще океана и играют важную роль в трансформации водных масс, захватывая и вентилируя более глубокие воды или опуская плотные поверхностные воды за счёт глубины перемешанного слоя. Верхние слои океана, в свою очередь, являются проводником между атмосферой и внутренней частью океана, поэтому понимание процессов, вызывающих изменение перемешанного слоя, имеет первостепенное значение для моделирования теплообмена и поглощения углерода океаном [Abernathy et al., 2016; Sallée et al., 2012].

Внутренние гравитационные волны в атмосфере могут распространяться вверх на очень большие высоты (до 400 км [Nishioka et al., 2013]) и переносить энергию и импульс от своего источника (обычно в тропосфере) до уровня, где они обрушиваются из-за сдвиговых и конвективных неустойчивостей, генерируя турбулентность, и диссипируют, оказывая тем самым влияние на термический режим и динамику верхней атмосферы. Таким образом, внутренние волны в атмосфере влияют на структуру атмосферной циркуляции и погоду [O'Connor, 1963], одновременно с этим вызывая изменение направления меридионального термического градиента в мезосфере [Fritts, Alexander, 2003]. Кроме того, их неустойчивость может выступать в качестве источника вторичных волн, оказывающих воздействие на термосферу [Oyama, Watkins, 2012].

Учет процессов, характеризующих взаимодействие океана и атмосферы в глобальных и региональных моделях климатической системы, имеющих масштабы, малые по сравнению с размерами численной сетки этих моделей, имеет решающее значение для улучшения моделирования климата и прогноза погоды, как в тропическом регионе, так и в полярных областях [Seo et al., 2023; Vihma et al., 2014; Репина и др., 2019]. Основными направлениями, по которым в настоящее время происходит совершенствование численных моделей изменения климата и

прогноза погоды, являются повышение пространственного разрешения в этих моделях и совершенствование методов параметризации процессов с подсеточными масштабами [Дымников, 2015]. Рассмотрим подробнее оба этих направления.

Во-первых, размеры мезомасштабных явлений малы по сравнению с размерами численной сетки в существующих глобальных и региональных моделях изменения климата. Следовательно, влияние этих явлений на циркуляцию атмосферы и океана и их взаимодействие между собой может быть учтено пока только с помощью адекватной параметризации. К процессам подсеточного масштаба относят: неадиабатические источники тепла (радиация, фазовые переходы влаги, облачность, осадки и т. д.); турбулентность в пограничном слое атмосферы, верхнем слое океана и придонном пограничном слое; конвекцию и гравитационные волны; циклы углерода и метана; фотохимические процессы; перенос тепла и влаги в почве, растительном покрове [Vitebro et al., 1999]; гидрологический цикл суши [Степаненко, 2008].

Во-вторых, мезомасштабные процессы участвуют в сложном взаимодействии атмосферы и океана. К примеру, мезомасштабные вихри в океане могут влиять на теплообмен между атмосферой и океаном, а также на характеристики приводной скорости ветра [Каменкович и др., 1987; Griffies et al, 2014; Huot et al., 2022]. Одновременно с этим, некоторые атмосферные фронты могут генерировать океанические вихри [Small et al, 2008]. Таким образом, для точного учета сложных обратных связей между атмосферными и океаническими процессами требуются связанные модели, которые могут отображать одновременно как атмосферные, так и океанические процессы с достаточно высоким разрешением [Perlin et al., 2020].

Наконец, понимание характеристик и механизмов генерации некоторых мезомасштабных процессов находится в стадии развития. Так, роль мезомасштабных вихрей в переносе тепла и питательных веществ в океане является активной областью исследований на сегодняшний день [Danabasoglu et al., 1994]. Подобные пробелы в понимании мезомасштабных явлений требуют экспериментальных и теоретических исследований их динамики и механизмов взаимодействия с целью усовершенствования параметризации этих процессов в моделях климата и прогноза погоды.

Цель диссертационной работы состоит в количественной оценке влияния внутренних волн в океане и атмосфере на турбулентные потоки тепла, импульса и концентрации углекислого газа в приводном слое атмосферы с использованием спутниковых и натурных наблюдений, и в установлении механизма возникновения наблюдаемой периодической модуляции обменных процессов.

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

- 1) Установить механизм генерации внутренних волн (ВВ) в океане субмезомасштабными вихрями;

- 2) Получить количественные оценки влияния ВВ в океане на флуктуации давления, температуры, скорости ветра и турбулентные потоки тепла и импульса в приводном слое атмосферы;
- 3) Установить влияние внутренних гравитационных волн (ВГВ) в атмосфере на вертикальные турбулентные потоки тепла и импульса через поверхность океана;
- 4) Установить влияние ВГВ на концентрацию CO_2 в приводном слое атмосферы полярных районов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Механизм генерации короткопериодных внутренних волн субмезомасштабными вихрями: спиралевидные полосатые структуры на периферии субмезомасштабных вихрей (на примере Мозамбикского пролива по данным PCA Sentinel-1A) являются проявлением внутренних волн с длинами волн порядка 100 м, генерируемых в устойчиво-стратифицированном слое термоклина при адвекции турбулентных неоднородностей плотности круговым течением вихря.
2. Статистически значимая связь между характеристиками внутренних волн в океане и вариациями метеопараметров и турбулентных потоков в приводном слое атмосферы. Подтверждена статистически значимыми максимумами когерентности между колебаниями температуры воды на глубинах 10–20 м и флуктуациями атмосферного давления, скорости ветра и температуры воздуха на периодах 4–15 мин, 18–20 мин, 35 мин, 1–3 ч и 4,7 ч. Внутренние волны в океане вызывают модуляцию вертикальных турбулентных потоков тепла и импульса с относительной амплитудой до 40 %, возрастающей с увеличением периода модуляции.
3. Единый дискретный набор периодов модуляции метеопараметров, концентрации CO_2 и турбулентных потоков в приводном слое атмосферы, связанных с внутренними гравитационными волнами (ВГВ) в атмосфере. Характеристики ВГВ для прибрежной зоны Антарктики.
4. Нелинейный механизм формирования «гребенчатых» спектров и множественных гармоник за счёт адвективной модуляции волн. Переменная адвекция частиц среды, вызванная суммарным полем внутренних волн (включая приливы, волны от солнечного терминатора и случайные источники), приводит к модуляции фазы каждой волны в эйлеровой системе координат. Это нелинейное взаимодействие генерирует многочисленные суммарные и разностные гармоники, чем объясняется появление дискретных спектральных максимумов во временных вариациях метеопараметров, концентрации CO_2 и турбулентных потоков.

Научная новизна исследования:

1. Экспериментально подтверждена в районе Мозамбикского течения теоретически обоснованная ранее [Johannessen et al., 2019; Chunchuzov et al., 2021a] генерация ВВ субмезомасштабными вихрями.

2. Впервые предложена модель формирования спиралевидных волновых гребней ВВ, объясняющая наблюдаемые формы и периоды мелкомасштабных полосатых спиралевидных структур на спутниковых снимках РСА.
3. Впервые показано, что внутренние волны в океане вызывают в приводном слое атмосферы временные колебания метеопараметров (скорости ветра, температуры, атмосферного давления) и вертикальных турбулентных потоков тепла и импульса в широком диапазоне доминантных периодов (10 мин, 18 - 20 мин, 35 мин, 1 ч, 3 ч и 4,7 ч).
4. Предложен резонансный механизм взаимодействия внутренних волн в слое термоклина с определёнными спектральными компонентами флуктуаций атмосферного давления, для которых частоты и горизонтальные фазовые скорости совпадают с соответствующими характеристиками внутренних гравитационных мод в термоклине.
5. Впервые установлено влияние ВВ в широком диапазоне периодов, общих для океанических и атмосферных внутренних волн, на турбулентные потоки тепла и импульса через поверхность океана.
6. На основе анализа натурных данных, полученных в прибрежной зоне Антарктики, и численного моделирования впервые установлен механизм формирования «гребенчатых» спектров флуктуаций метеопараметров, обусловленный нелинейной адвекцией частиц воздуха в суммарном поле атмосферных внутренних гравитационных волн, приливов и волн от солнечного терминатора.
7. Впервые установлена и экспериментально подтверждена количественная связь между частотными спектрами флуктуаций температуры воздуха, концентрации CO_2 и горизонтальной скорости ветра в приводном слое атмосферы, обусловленная адиабатическими вертикальными смещениями частиц воздуха в поле внутренних гравитационных волн.

Теоретическая и практическая значимость. Разработанная модель генерации спиралевидных ВВ субмезомасштабными вихрями ($R_o \gg 1$) необходима для лучшего понимания механизмов образования ВВ в океане. В свою очередь, изучение характеристик и динамики ВВ может помочь в обеспечении безопасности подводного мореплавания [Zang et al., 2023] и строительства [Xiao, 2024; Тюгин, 2014]. Кроме того, эти исследования могут стать основой для планирования и проведения полевых экспериментов по изучению ВВ и мезомасштабной изменчивости в приполярных морях.

Результаты исследования влияния ВВ на модуляцию турбулентных потоков импульса, явного и скрытого тепла, метеоэлементов (атмосферного давления, скорость ветра и температуры воздуха) и концентрацию диоксида углерода вблизи поверхности моря могут найти практическое применение в разработке параметризации этих процессов в моделях прогноза погоды и климата.

Исследования частотных спектров флуктуаций температуры и концентрации примесей позволяют расширить представление о механизмах мезомасштабной изменчивости парниковых газов и улучшить представление о нелинейном взаимодействии волновых процессов в атмосфере.

Полученные результаты могут также служить в качестве экспериментальной базы для верификации численных моделей высокого разрешения генерации и распространения ВВ.

Степень достоверности определяется тем, что научные выводы, сделанные в диссертации, получены с использованием апробированной методики на обширном массиве наблюдений с корректной оценкой статистической значимости. Достоверность и новизна научных результатов подтверждаются публикациями в ведущих профильных рецензируемых журналах и выступлениями на профильных конференциях.

Апробация работы. Основные результаты, изложенные в диссертации, были представлены на 12 международных и всероссийских научных конференциях и семинарах: X Международная научно–практическая конференция «Исследования и образование MARESEDU - 2021» (Москва, 25-29 октября 2021 г.); XIX Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 25-29 ноября 2021 г.); XVIII Большой Географический Фестиваль (Санкт-Петербург, 8-10 апреля 2022 г.); Arctic Observing Summit 2022 (Тромсё, Норвегия, 30 март – 1 апрель 2022 г.); VII Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий (Майкоп, 15 – 19 мая 2023 г.); Конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде «CITES - 2023» (Москва, 13-16 июля 2023 г.); Моря России: от теории к практике океанологических исследований (25 – 29 сентября 2023 г., г. Севастополь); Russian-China workshop: 15th Conference of Atmospheric Physics, Climate and Environment (Москва/ Ханты-Мансийск, 11-16 сентября 2023 г.); VIII Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (13-17 мая 2024 г., г. Владивосток); XIII Международная конференция по измерениям, моделирования и информационным системам для изучения окружающей среды “Enviromis - 2024”(1-6 июля, 2024 г., г. Томск); XXI Научная школа «Нелинейные волны» (5-11 ноября 2024 г., г. Нижний Новгород); 2025 Xiamen symposium on marine environmental science (14 – 17 января 2025 г., Сямень, Китай).

Личный вклад автора. Автор лично принимал участие во всех этапах работы — от участия в экспедиционных исследованиях по измерению характеристик ВВ до формулирования основных результатов и выводов. Автором проведён отбор и анализ спутниковых РСА изображений, а также поиск и визуальное выделение на поверхности океана спиралевидных структур в виде чередующихся темных и светлых полос, которые продолжаются и за условными границами центральной части вихря. Автором выполнена обработка и анализ экспериментальных данных, включая анализ кросс-спектров между метеовеличинами и температурой воды на разных глубинах, турбулентных потоков тепла и импульса. Соискателем были оценены характеристики распределения концентрации CO₂ в приводном слое атмосферы в районе Восточной Антарктиды. Соискателем написаны все статьи, в которых она является первым автором, и части статей,

опубликованных в соавторстве, а также представлены результаты работы в научных докладах и на конференциях.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 4 статьи в рецензируемых журналах, 4 из которых входят в систему индексирования Scopus и WoS, ядро РИНЦ, белый список и список ВАК. Во всех опубликованных работах вклад автора является определяющим.

Благодарности. Автор выражает свою признательность научному руководителю д.ф.-м.н. Репиной Ирине Анатольевне за безграничное терпение и помощь на всех этапах выполнения диссертации. Автор благодарен за поддержку в работе д.ф. - м.н. Чунчузову Игорю Петровичу. Также автор выражает благодарность проекту “Плавучий университет” и лично к.ф.-м.н. Степановой Наталье Борисовне и д.ф. - м.н. Осадчеву Александру Александровичу за помощь в измерениях в рейсе и поддержку. Автор благодарен коллективу Российской Антарктической Экспедиции и лично к.г.н. Иванову Борису Вячеславовичу и Безгрешнову Андрею Михайловичу за возможность участия в экспедиции в Антарктиду и полезные советы.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка условных сокращений, списка использованных источников из 237 наименований. В ней содержится 179 страницы, 2 таблицы и 50 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность и степень разработанности темы исследования, основная цель исследования, поставленные задачи, методология и методы исследования, научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, основные защищаемые положения, степень достоверности полученных результатов, апробация результатов исследования, личный вклад автора и список опубликованных диссертантом работ.

В **Главе 1** описаны внутренние волны в атмосфере и в океане как объекты исследования, их механизмы генерации и способы измерения (контактные и дистанционные).

Внутренние волны (ВВ) в океане образуются в устойчиво-стратифицированных слоях океана при выведении частицы среды из положения равновесия, что приводит к возникновению возвращающей силы (или силы плавучести), равной разнице силы Архимеда и силы тяжести. Диапазон частот линейных внутренних волн лежит между частотой Брента-Вяйсяля (БВ) и инерционной частотой (или параметром Кориолиса). Распределение энергии внутренних волн по их волновым числам и частотам описывается эмпирическим спектром Гаррета-Мунка.

В литературе описано большое количество механизмов генерации ВВ (трансформация приливных волн, обтекание сложного рельефа дна и т.д.). При этом механизм генерации внутренних волн субмезомасштабными вихрями относится к малоизученным.

ВВ обнаруживаются с помощью наземных и спутниковых измерений практически во всем Мировом океане. Наиболее распространённым типом спутниковой информации для исследования

ВВ являются данные радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА). Спутниковые наблюдения за поверхностными проявлениями ВВ позволяют выделить районы локализации волн, определить их пространственно-временные характеристики, а также отследить и проанализировать возможные механизмы генерации. Измерения ВВ проводятся с судов и буйковых станций и включают как минимум определение их амплитуды и периода.

В данной работе для исследования ВВ используются следующие контактные методы: многоканальный метод – измерения температурных профилей в верхнем слое моря до глубины 50 м с малым интервалом по времени для оценки временной изменчивости вертикального распределения температуры с высоким разрешением и измерение температуры поверхности океана с помощью инфракрасного (ИК) радиометра для определения проявления внутренних волн в температуре поверхности океана.

Атмосферные внутренние гравитационные волны (ВГВ) или волны плавучести, как и подобные волны в океане, образуются в устойчиво стратифицированной атмосфере. Частота гравитационных колебаний определяется величиной вертикального градиента потенциальной температуры.

ВГВ оказывают существенное влияние на конвективные процессы в тропосфере, перенос энергии и импульса между различными слоями в атмосфере, на процессы генерации турбулентности и турбулентное перемешивание в нижней и верхней атмосфере.

Наблюдения ВГВ в атмосфере проводятся как с использованием контактных методов, так и методов дистанционного зондирования. Что касается методов дистанционного зондирования, то в литературе описаны многочисленные случаи наблюдений атмосферных внутренних волн на РСА снимках морской поверхности, проведён их анализ и интерпретация. Среди контактных методов измерения параметров ВГВ (периоды, амплитуды, фазовые скорости и направления распространения) выделяется применение таких приборов как содары, лидары, микробарографы и другие.

В данной работе используются следующие контактные методы для обнаружения ВГВ: измерение метеорологических параметров на судовых автоматических метеостанциях (АМС) и измерения концентрации диоксида углерода в приводном слое атмосферы.

ВГВ вызывают почти периодические смещения частиц воздуха и компонент их скорости. Переменная во времени и пространстве адвекция газовых примесей и аэрозоля, вызванная волнами, приводит к осцилляции их концентраций. Также она способствует формированию определенного вида горизонтальных, вертикальных и частотных спектров осцилляций концентраций примесей. Таким образом, концентрация углекислого газа может служить маркером для выявления ВГВ.

Обзор предмета исследования показывает, что внутренние волны как в атмосфере, так и в океане представляют собой весьма сложные процессы для регистрации и анализа. Это связано с

тем, что они характеризуются малыми пространственно-временными масштабами, что затрудняет их точное измерение и мониторинг.

В главе 2 проводится исследование механизма формирования мелкомасштабных полосатых спиралевидных структур на периферии субмезомасштабного вихря с использованием спутниковых снимков. Апробирована теоретическая модель. Показано, что наблюдаемые формы и пространственные периоды спиралевидных структур хорошо согласуются с формами волновых гребней внутренних волн в слое термоклина и их длинами волн.

В качестве района исследования выбрана область в северной части Мозамбикского пролива, вблизи Коморских островов – в районе с активной вихревой динамикой, где Мозамбикское течение формирует систему мезо- и субмезомасштабных вихрей.

Методика работы включала несколько этапов. Во-первых, анализ спутниковых РСА-снимков Sentinel-1A за период с 2014 по 2017 год. Всего было обработано 986 снимков, из которых лишь на 10 были обнаружены чёткие спиралевидные полосатые структуры на периферии вихрей. Использовалась специальная методика выделения вихрей, описанная в работах [Митягина, Лаврова, 2009]. Во-вторых, привлекались данные о скорости поверхностного течения, профилях температуры, солёности и квадрата частоты Вэйсяля-Брента по реанализу GLORYS12V1, а также данные ERA5 о поле ветра. Наконец, проводился спектральный анализ вариаций интенсивности отражённого сигнала для выявления пространственных периодов полос, и выполнялось теоретическое моделирование генерации внутренних волн.

На снимке от 22 сентября 2017 г. был обнаружен вихрь диаметром ~ 4 км вблизи островов Нгазиджа и Мохели, на периферии которого наблюдалась периодическая полосатая структура с расстояниями между полосами 2–4 км, внутри них зафиксированы более мелкомасштабные полосы с периодом порядка 100 м (рис.1). Расстояние между ближайшими спиралевидными полосами растёт при удалении от центральной части вихря. Спектральный анализ подтвердил наличие значимых спектральных максимумов на периодах 140 и 300 метров, которые устойчивы к изменению окна сглаживания и значительно превышают шумовой фон. Второй вихрь, обнаруженный 25 сентября, имел диаметр около ~ 5 км, однако проявление полосатой структуры у него было значительно слабее.

Оценка числа Россби для первого вихря при характерном радиусе 2 километра и азимутальной скорости 0,3 метра в секунду даёт значение около 9–10. Это означает, что вихрь является сильно закрученным, далёким от геострофического равновесия, и не может быть описан классическими теориями для малых чисел Россби.

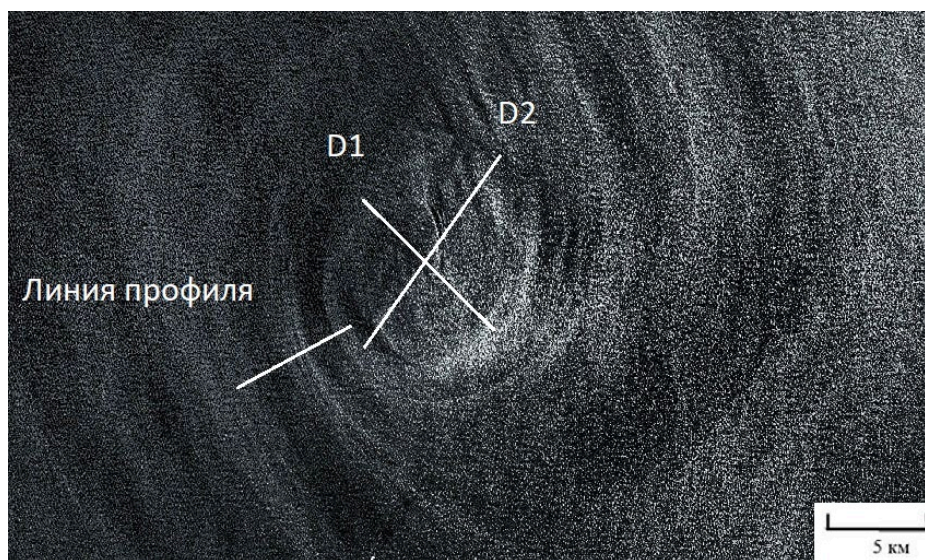


Рис. 1. Вихрь, наблюдающийся 22 сентября 2017 года. Линии D1 и D2 являются диаметрами вихря. Вдоль линии профиля построена зависимость отражённого сигнала от расстояния.

Для объяснения наблюдаемых периодических спиралевидных структур была рассмотрена трёхслойная модель стратификации океана, в которой тонкий приповерхностный слой термоклина толщиной 10–20 метров имеет максимум частоты Вайсяля–Брента и служит волноводом для внутренних волн. Также в модели течение в вихре является изначально турбулентным и содержит случайные неоднородности скорости течения, температуры и плотности разных горизонтальных и вертикальных масштабов.

По данным реанализа 22 сентября 2017 года максимальный градиент температуры и максимум частоты ВБ N_1 наблюдались в тонком приповерхностном слое термоклина толщиной $h_1 = 10\text{--}20$ м. Значения N_1 для трех профилей $N^2(z)$ лежат в интервале 0,01 - 0,02 рад/с, следовательно для $N_1 = 0,02$ рад/с фазовая скорость моды с $n = 1$ лежит в интервале 0,06 - 0,1 м/с. Эти фазовые скорости ВБ не превышают скорости приповерхностного течения в вихревых структурах.

При прямолинейном движении неоднородности со скоростью, превышающей фазовые скорости внутренних гравитационных мод в термоклинном волноводе, формы волновых линий (гребней или ложбин) этих мод подобны форме корабельных поверхностных волн от движущегося корабля. Это предположение всегда справедливо при толщине слоя термоклина порядка 10 м и типичной частоте Брента-Вайсяля в этом слое.

При переходе от прямолинейного движения волнового источника к его круговому движению со скоростью V вдоль круговой траектории радиусом R удобно перейти от декартовых координат (x, y) произвольной точки, расположенной на небольшом расстоянии от периметра окружности, к ее криволинейным координатам (r, θ) с помощью следующего преобразования переменных: $r = R + y$, $\theta = x/R$. Тогда, уравнения фазовых линий $x = x_m(\varphi)$, $y = y_m(\varphi)$, переходят в

следующие уравнения в параметрической форме, записанные относительно параметра $\theta_m = x_m / R$ - углового расстояния, проходимого источником вдоль круговой траектории за время t от начала движения в момент $t=0$:

$$X(\theta_m) = r \sin \theta = (R + y_m) \sin \theta_m \quad (1)$$

$$Y(\theta_m) = r \cos \theta = (R + y_m) \cos \theta_m \quad (2)$$

Фазовые линии (1) и (2) за пределами круговой траектории источника имеют спиралевидную форму (рис. 2), и для произвольного радиального направления от центра круга локальное расстояние между соседними фазовыми линиями увеличивается с ростом расстояния от него. Наблюдаемое "расщепление" широких полос на более тонкие с масштабом ~ 100 м соответствует локальной длине волны моделируемых внутренних волн. Для выбранных параметров стратификации и азимутальной скорости течения на периферии вихря: $\varepsilon = 6 \times 10^{-4}$, $V = 0,3$ м/с, $h_0 = 100$ м, расчетные фазовые линии (показанные для $m=100, 101, 102$), наиболее близки по своей форме и параметрам к наблюдаемой спиралевидной полосатой структуре на снимке (рис.2. внизу).

Проведён анализ чувствительности формы волновых линий и расстояний между ними к вариациям азимутальной скорости V и ε . При изменении V на $\pm 0,1$ м/с (в пределах диапазона скоростей, наблюдаемых в реанализе) и изменении ε на $\pm 1 \cdot 10^{-4}$ рассчитанные фазовые линии сохраняют общую спиралевидную конфигурацию. Локальные длины волн (расстояния между соседними гребнями) меняются при этом не более чем на 15–20 %, что не нарушает качественного согласия с наблюдаемой структурой. Более точная количественная подгонка параметров не требуется, так как целью модели является объяснение механизма генерации мелкомасштабных полос, а не их точное воспроизведение.

В спектре вариаций интенсивности отраженного сигнала, кроме спектральных максимумов на частотах $f_1 = 0,007$ м⁻¹ и $f_2 = 0,0033$ м⁻¹, имеются также и другие локальные спектральные максимумы, например, на комбинационных частотах $f_3 = f_1 + f_2 = 0,0103$ м⁻¹ (период 97 м), $f_4 = f_1 + 2f_2 = 0,0097$ м⁻¹ (период 103 м) и других комбинационных частотах. Такие спектральные максимумы могут образовываться вследствие нерезонансных нелинейных взаимодействий спектральных компонент f_1 , и f_2 , возникающих из-за адвективной нелинейности $(\vec{v}V)\vec{v}$ уравнений движения среды.

Таким образом, в Главе 2 на примере Мозамбикского пролива установлен механизм генерации короткопериодных внутренних волн субмезомасштабными вихрями и показано, что даже столь малые вихревые структуры (масштаб $\sim 4 - 5$ км) могут служить источником волновых возмущений в слое термоклина. Но в реальном океане внутренние волны генерируются и множеством других источников — приливными течениями, флуктуациями атмосферного давления, фронтальными зонами. Совокупное действие всех этих механизмов создаёт непрерывный волновой фон, который, достигая поверхности океана, модулирует поля скорости ветра, температуры и атмосферного давления в приводном слое. Поэтому в следующей главе

переходим от исследования механизма генерации к исследованию эффектов влияния уже существующего волнового поля на процессы обмена между океаном и атмосферой, используя для этого данные комплексных натурных наблюдений в Карском море.

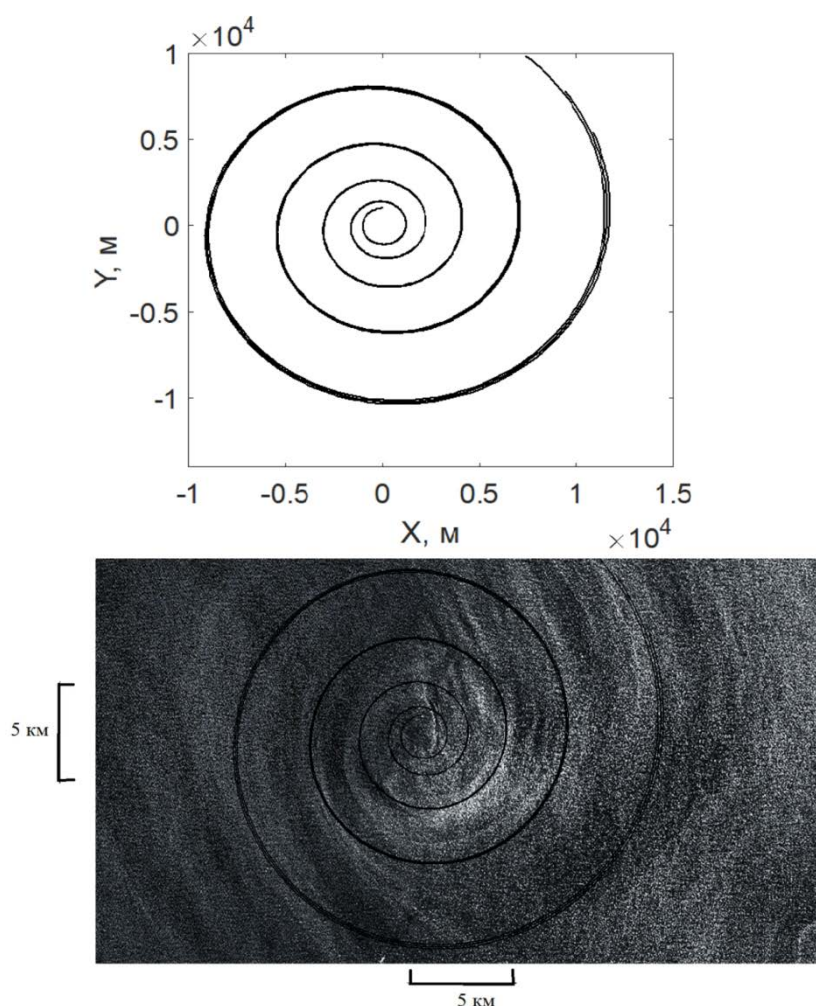


Рис.2. Расчет формы волновых линий от движущегося источника внутренних волн с азимутальной скоростью $V = 0,3$ м/с на расстоянии $r = 1$ км от центра вихря (вверху) и сравнение расчетной формы волновых линий со спиралевидной полосатой структурой вихря на снимке (внизу).

Глава 3 посвящена исследованию характеристик внутренних волн в Карском море (характерных периодов, фазовых скоростей и направлений распространения) и их влияния на мезомасштабные флуктуации (периоды от нескольких минут до нескольких часов) атмосферных полей скорости ветра, давления, температуры и вертикальных турбулентных потоков тепла и импульса в приводном слое атмосферы. Эти исследования проводятся на основе данных измерений температуры на разных глубинах Карского моря, полученных во время экспедиции “Плавучий Университет” в 2021 году, и данных измерений метеопараметров на борту судна.

В августе 2021 года в ходе экспедиции «Плавучий университет ИО РАН — МФТИ» в Карском море на НИС «Академик Иоффе» проводился комплекс измерений, включавший

регистрацию температуры поверхности моря с помощью ИК-радиометра HEITRONICS KT19 II, вертикальных профилей температуры воды до глубины 50 м с использованием термокос (TPArctic и цепочек термисторов Starmon StarOddi), а также метеопараметров (скорости и направления ветра, температуры и влажности воздуха, атмосферного давления) с помощью судовой метеостанции AIRMAR 220 ws, установленной на высоте 22 м над уровнем моря.

Статистическая обработка временных флуктуаций метеорологических полей осуществлялась посредством нескольких методов, включающих в себя спектральный анализ, прогрессивный многоканальный корреляционный метод и метод расчёта турбулентных потоков тепла и импульса на основе алгоритма COARE. Все исходные временные ряды перед применением спектральных и корреляционных методов прошли этап предварительной обработки.

Когерентный анализ данных измерений трех разнесенных термокос, регистрировавших колебания температуры на глубине 18 м за период 22 минуты, позволил выявить короткопериодные внутренние волны с периодами 40–160 секунд. Методом кросс-корреляции колебаний температуры в разных точках определены направление распространения (обратный азимут $\sim 108^\circ$) и фазовая скорость ($\sim 0,15$ м/с) волн относительно судна. Учет дрейфа показал их распространение на северо-восток с групповой скоростью $\sim 0,46$ м/с в неподвижной системе координат. Эти высокочастотные колебания, превышающие локальную частоту Вяйсяля-Брента, интерпретируются как гармоники, генерируемые нелинейными взаимодействиями основных внутренних волн, вызванных обтеканием рельефа дна пролива Карские Ворота приливными течениями.

На основе спектрального анализа данных контактных измерений в Карском море показано, что внутренние волны (ВВ) в океане вызывают в приводном слое атмосферы временные колебания метеопараметров (скорости ветра, температуры, атмосферного давления) и вертикальных турбулентных потоков тепла и импульса в широком диапазоне доминантных периодов (10 мин., 18-20 мин., 35 мин., 1ч, 3 ч и 4,7 ч). Эти доминантные периоды обнаружены одновременно во временных вариациях метеопараметров (по данным измерений метеостанции на высоте 22 м) и временных вариациях температуры воды на разных глубинах - 0 м, 10 м и 20 м (по данным измерений радиометра и термодатчиков). Анализ гистограмм распределения числа спектральных максимумов по разным периодам колебаний показал, что наибольшее число этих максимумов за весь временной интервал измерений в 6 дней приходился на диапазон периодов 1-3 ч, общий для всех флуктуаций метеопараметров.

Анализ когерентности и фазовых спектров между флуктуациями температуры воды на глубинах 10 и 20 м (длина реализации 4000 с), T_{10} и T_{20} , между флуктуациями T_{10} и флуктуациями атмосферного давления P и скорости ветра V , показал наличие максимумов когерентности 0,6-0,7 на общих периодах, близких к 4,5 мин, 10 мин и 15 мин (рис. 3). Сдвиги фаз между флуктуациями T_{10} и давления P , или скорости ветра V , на этих периодах были как положительными, равными

нулю, так и отрицательными, что указывало на возможность на указанных периодах запаздывания по времени, синфазности и опережения колебаний давления, или скорости ветра, от колебаний температуры воды на глубине 10 м. При синфазности на некоторых периодах колебаний T_{10} и спектральных компонент флуктуаций давления P возможно резонансное взаимодействие этих колебаний при условии совпадения их частот и горизонтальных скоростей распространения.

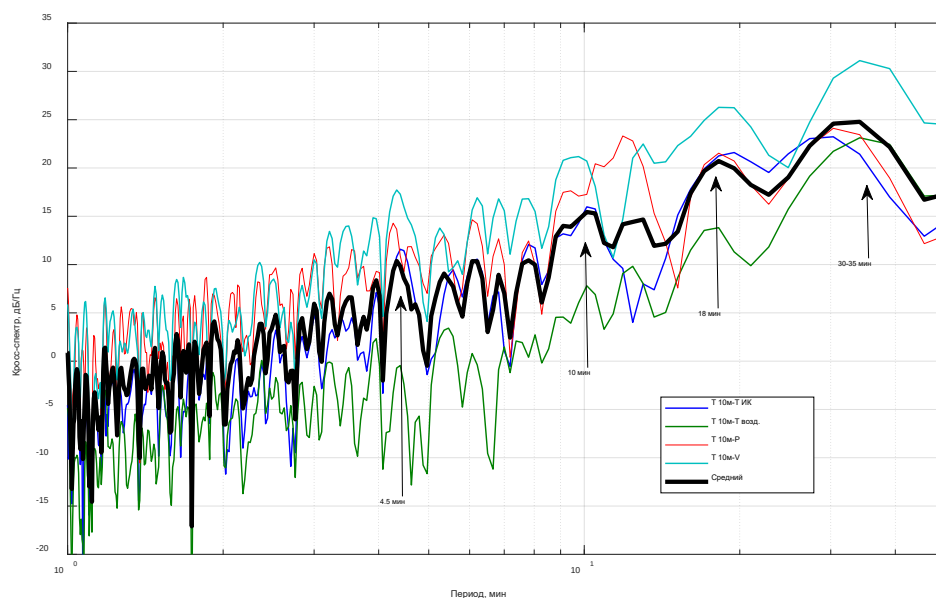


Рис. 3. Взаимные кросс-спектры между флуктуациями температуры воды на глубине 10 м (T_{10}) и атмосферного давления (P), температуры T_{10} и скорости ветра (V), температуры T_{10} и температуры поверхности океана ($T_{ик}$), температуры T_{10} и температуры воздуха ($T_{возд}$), и средний кросс-спектр для указанных выше 4-х кросс-спектров (жирная черная кривая) (а); Те же кросс-спектры, что и на рис. 3.8 а, только для температуры воды на глубине 20 м. Показан также кросс-спектр между флуктуациями температуры воды на глубинах 10 и 20 м (пунктир) (б). Длина реализации 1.9 часа ($N=6840$ чисто отсчётов). Перекрытие 50%. Число степеней свободы 20.

Для короткого промежутка времени длительностью 22 мин. были отфильтрованы короткопериодные ВВ с периодами в 2-3 мин. методом когерентного анализа флуктуаций температуры в трех горизонтально разнесенных точках. Когерентность между флуктуациями достигала 0,6-0,8 на периодах 4-15 минут (рис. 4). С учетом направления и скорости дрейфа судна в течение короткого промежутка времени были оценены групповые скорости ВВ относительно судна и неподвижной земли. Эти короткопериодные ВВ являлись частью пакета нелинейных ВВ, наблюдавшегося 12 августа 2021 г. [Kozlov et al. 2023], и генерировались при обтекании устойчиво-стратифицированным приливным течением сильно изрезанной топографии дна Карского пролива.

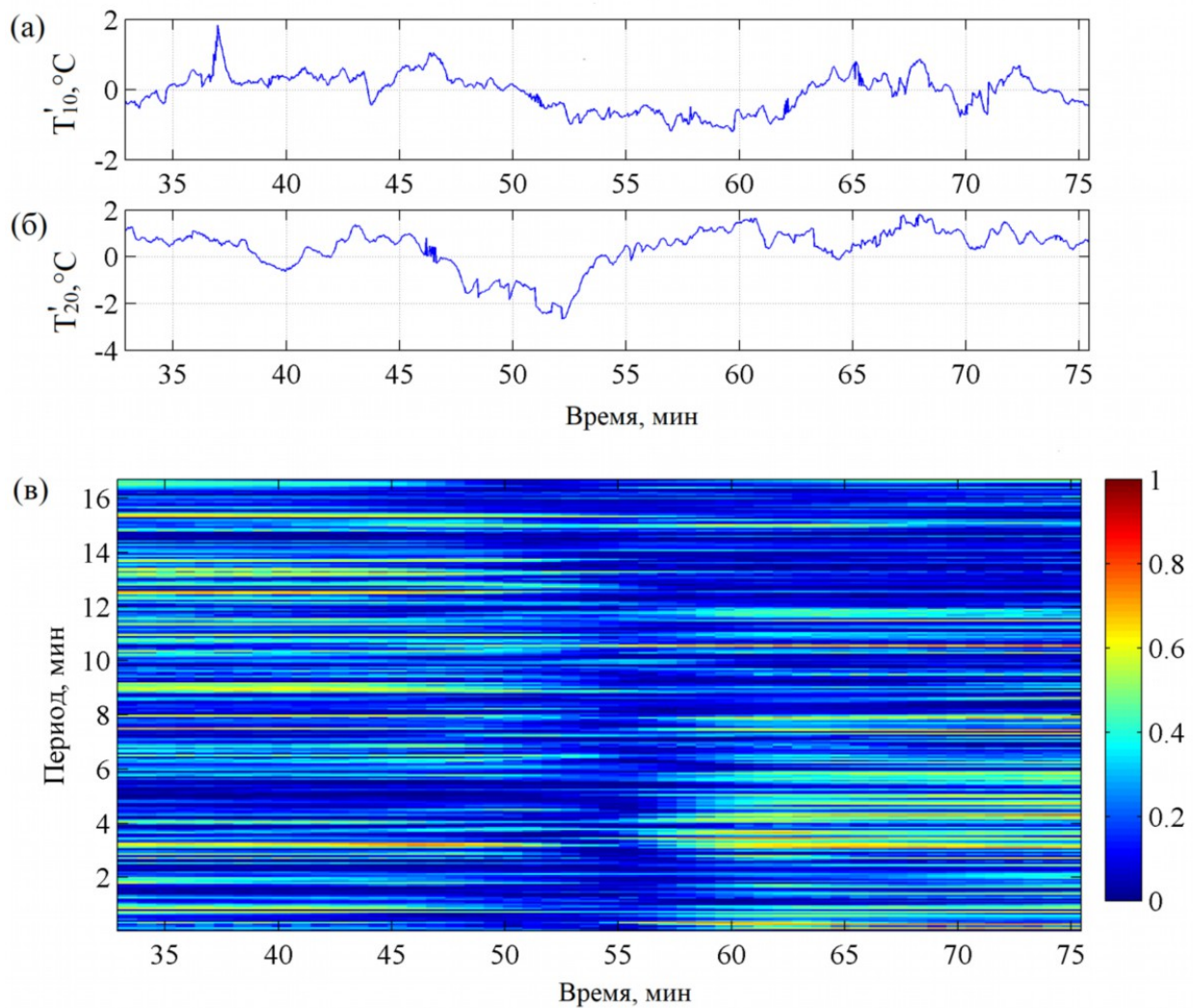


Рис. 4 Флуктуации температуры относительно ее среднего значения на глубинах 10 м (T_{10}) (а) и 20 м (T_{20}) (б) и их когерентность (в) в зависимости от времени для интервала анализа временной реализации температуры длиной 4000 с, со скользящим окном 100 с и шагом сдвига 50 с. Число степеней свободы – 2.

Было показано, что наличие дискретного набора периодов от нескольких минут до нескольких часов во временных вариациях температуры воды обусловлено нелинейным процессом адвекции частиц среды, вызванным ВВ и приливами. Переменная адвекция приводит к модуляции фаз, фазовых скоростей и частот этих волн в эйлеровой системе координат, т.е. в каждой неподвижной точке пространства. Эта модуляция создается переменными во времени смещениями частиц среды в каждой точке, вызванными приливами, ВВ с частотами, близкими к инерционной частоте и к частоте ВБ., и их многочисленными гармониками с суммарными и разностными частотами. Этот процесс формирует частотные спектры флуктуаций температуры с множественными спектральными максимумами и влияет на их когерентность с флуктуациями метеопараметров приводного слоя и спектры временных вариаций турбулентных потоков тепла и импульса.

Наблюдаемая модуляция потоков тепла и импульса относительно их средних значений менялась в разные промежутки времени от 10 % до 40 %. При этом с увеличением частоты (или с уменьшением периода от 5 ч до 20 мин) спектральные амплитуды вариаций потоков уменьшались пропорционально f^{-p} , где p лежит в интервале от 2 до 3. Таким образом, относительная модуляция потоков возрастала с ростом периода модуляции.

Обнаруженную в главе модуляцию внутренними волнами турбулентных потоков тепла и импульса через поверхность океана в широком диапазоне периодов (от десяти минут до 5 ч) необходимо учитывать при параметризации влияния мезомасштабных процессов взаимодействия атмосферы и океана в моделях изменения климата.

Установленная в главе статистическая взаимосвязь флуктуаций температуры воды и метеопараметров (атмосферного давления и скорости ветра) требует исследования совместного влияния этих флуктуаций на модуляцию турбулентных потоков тепла и импульса в приводном слое атмосферы. Это исследование проводится в следующей главе.

Глава 4 посвящена исследованию влияния ВГВ на вертикальные турбулентные потоки тепла, импульса и концентрации CO_2 в приводном слое атмосферы Антарктики.

В рамках 68-й и 69-й Российских антарктических экспедиций на НЭС «Академик Федоров» проводились измерения концентрации CO_2 с помощью газоанализатора ОПТОГАЗ-500.4- CO_2 и SBA-5 CO_2 Gas Analyzer, температуры поверхности океана — ИК-радиометром HEITRONICS KT19 II, а метеопараметров — АМС Milos-520. Забор проб воздуха осуществлялся на высоте 20 м над уровнем моря, данные корректировались с учётом направления ветра для исключения собственного влияния судна.

Измерения концентрации CO_2 проводились во время продолжительных стоянок (более 10 дней) НЭС «Академик Фёдоров» вблизи антарктических станций Прогресс и Мирный (02 — 12 января 2023 г — Прогресс_1; 17 — 27 февраль 2023 г — Мирный; 02 — 20 января 2023 г — Прогресс_2; 02 — 14 декабря 2023 г — Прогресс_3).

Исследуются колебания концентрации CO_2 , ТПО и метеопараметров (скорости ветра, температуры воздуха) и их амплитудные кросс-спектры.

Путем анализа кросс-спектров метеопараметров (температуры воздуха и скорости ветра), ТПО, турбулентных потоков тепла, потока импульса и концентрации CO_2 были выявлены в этих спектрах колебания с периодами в 27 мин, 40 мин, 50 мин, 2 ч, 3 ч, 6 ч (рис.5). Значимость спектральных максимумов была подтверждена статистически путем анализа ежедневных спектров за все дни стоянок судна в Антарктиде (всего 50 дней) и 6 дней измерений на станции Тикси (Арктика) (измерения на станции Тикси используется для независимой верификации метода). Анализ спектров турбулентных потоков явного (Q_H) и скрытого тепла (Q_L), потока импульса (τ) и кросс-спектра между вариациями параметра стратификации R и концентрации CO_2 , полученных за длительные (более 10 дней) промежутки времени стоянки судна на станции Прогресс_1 (2 – 12

января 2023 года), Прогресс_2 (с 2 по 20 февраля 2023), Прогресс_3 (2 – 14 декабря 2023 г.) и Мирный (17 – 27 января 2023 года), показывает наличие в них спектральных пиков с 3-х суточными, 2-х суточными, суточными (24 ч) периодами, и периодами в 10 и 6 часов. Колебания с набором доминантных периодов, зафиксированных в спектрах и кросс-спектрах метеопараметров и турбулентных потоков, наблюдались и ранее в вариациях атмосферного давления и скорости ветра на сети разнесенных в пространстве микробарографов и содаров в Московском регионе [Chunchuzov et al. 2021]. Колебания с периодами 24 ч и 12 ч могут генерироваться солнечными приливами (суточным и полусуточным) и солнечным терминатором [Hedlin et al. 2018; Chunchuzov et al. 2021].

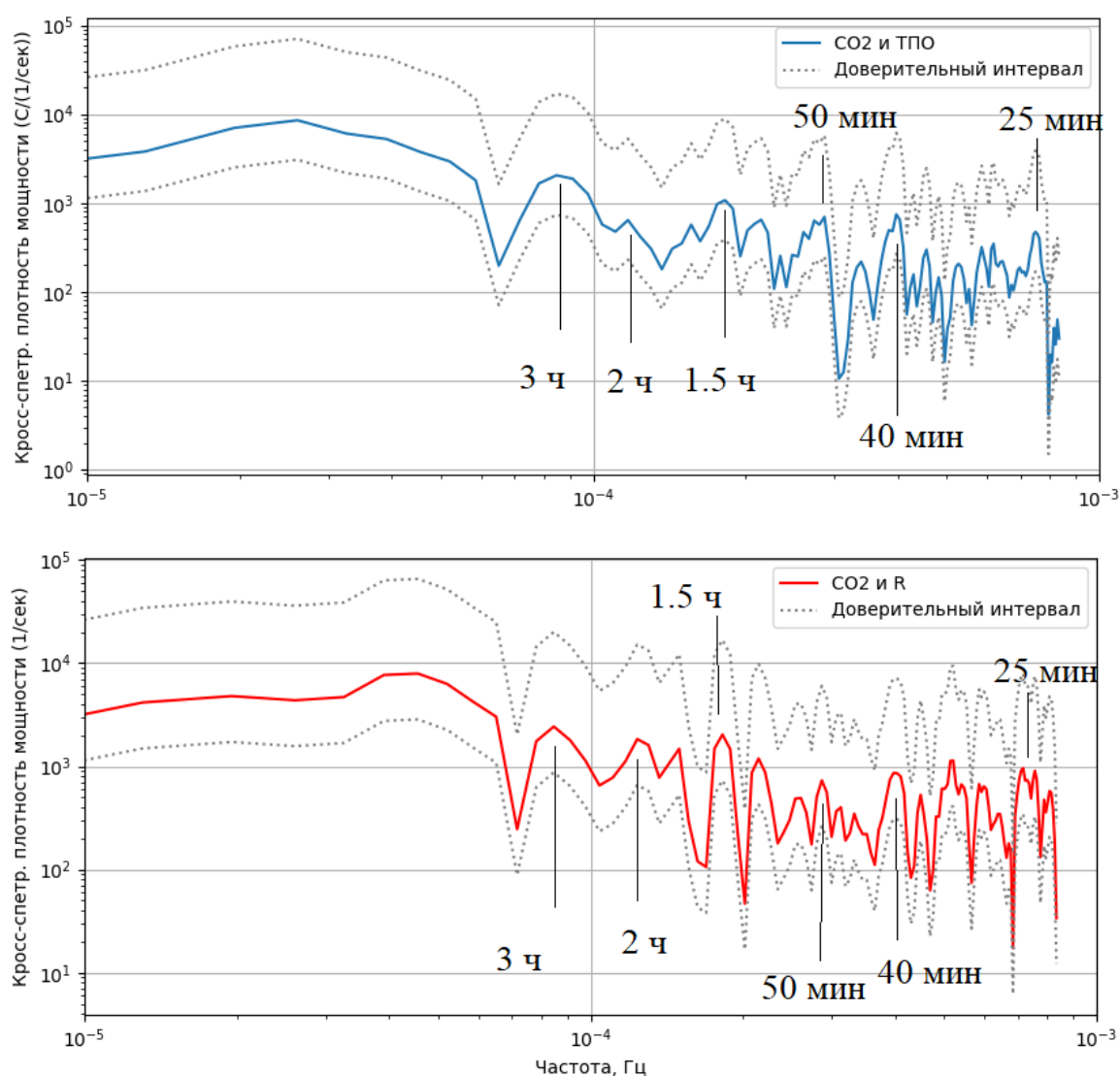


Рис. 5. Кросс-спектры между вариациями ТПО и концентраций CO_2 (верхняя панель) и между вариациями CO_2 и параметром стратификации R (нижняя панель) за период 02 января 2023 года в период стоянки судна в бухте Тала вблизи станции Прогресс. Длина реализации 24 часа, окно сглаживания 12 часов. Число точек $N=144$. Перекрытие 50%. Число степеней свободы – 5.

Стоит отметить, что спектры концентрации CO_2 , рассчитанные с использованием данных двух разных приборов, показывают одинаковые доминантные периоды, описанные выше.

Корреляционный анализ флуктуаций скорости ветра, температуры и давления в трёх пунктах (14–20 февраля 2023 г.) выявил когерентные колебания, вызванные приливами и ВГВ. Максимумы когерентности (0,6–0,8) достигались на периодах, близких к 12, 8, 3,5 и 2,8 ч. После фильтрации флуктуаций скорости ветра и давления в диапазоне периодов 3,47–2,78 ч методом РМСС определены параметры волн: для 16 февраля в промежутке времени 30–42 ч (отсчитываемого относительно 14.02.2023 06:50 UTC) азимуты составляли 250–280°, а горизонтальные фазовые скорости 0,5 – 2 м/с; а для интервала 90–105 ч (19 февраля) – 65–75° и 0,5–6 м/с, соответственно. В первый промежуток времени стратификация атмосферы была устойчивой до высоты 14 км и в нижнем слое тропосферы 0 – 1000 м, а во второй промежуток времени стратификация атмосферы тоже была в основном устойчивая во всем нижнем слое до высоты 14,2 км и с максимумом N^2 в приподнятом слое 200 – 400 м, но существовали тонкие конвективно-неустойчивые тропосферные слои с $N^2 < 0$ на высотах 400 – 500 м, 3 км и 5 км.

Наблюдаемые фазовые скорости (0,5 – 6 м/с) были сравнимы по величине с амплитудами колебаний скорости ветра (0,5 – 1 м/с), что указывало на нелинейный характер распространения ВГВ, приводящий к модуляции фазы и генерации многочисленных гармоник ВГВ и приливов.

Для объяснения сложной «гребенчатой» структуры наблюдаемых спектров предложен механизм, учитывающий нелинейные эффекты адвекции воздушных частиц и примесей в суммарном поле ВГВ и приливов. Для оценки влияния адвекции на спектр флуктуаций скорости ветра рассмотрена модель, в которой колебания лагранжевой скорости частицы вызваны четырьмя источниками: суточным приливом ($T_1 = 24$ ч), солнечным терминатором, регулярно генерирующим ВГВ с полусуточным периодом ($T_2 = 12$ ч), сейсмо-гравитационными колебаниями Земли с периодом ($T_3 = 2$ ч) (регулярный источник) и короткопериодными ВГВ ($T_4 = 10$ мин), близким к некоторому среднему периоду Брента-Вяйсяля в тропосфере, которые могут генерироваться случайными источниками, такими как конвекция, метеофронты, сдвиги скорости ветра, орография и др. Под действием 4-х колебаний происходит смещение частиц среды из их первоначального (невозмущенного волнами) положения с лагранжевой колебательной скоростью:

$$u'_L = V_1(z_1)\cos(w_1t) + V_2(z_1)\cos\left(w_2t + \frac{\pi}{8}\right) + V_3(z_1)\cos\left(w_3t + \frac{\pi}{4}\right) + V_4(z_1)\cos\left(w_4t + 3\frac{\pi}{8}\right) \quad (3)$$

где V_i (с)- амплитуды колебаний скорости частиц среды в зависимости от их вертикальной координаты z_i ($i = 1,2,3,4$), а $\omega_i = 2\pi/T_i$ - круговые частоты этих колебаний, имеющих произвольные начальные фазы.

Медленные гравитационные моды ВГВ в тропосфере, чьи фазовые скорости ($C_1 = 10$ м/с, $C_2 = 7$ м/с, $C_3 = 5$ м/с, $C_4 = 4$ м/с) сравнимы с амплитудами колебательной скорости частиц ($V_1 = 5$ м/с, $V_2 = 4$ м/с, $V_3 = 1$ м/с, $V_4 = 0,8$ м/с), испытывают сильное влияние адвекции в суммарном поле скоростей. Для указанных выше частот волн и их фазовых скоростей можно рассчитать

соответствующие горизонтальные волновые числа ($K_{x,1} = 7,27 \cdot 10^{-6}$ рад/м, $K_{x,2} = 2,08 \cdot 10^{-5}$ рад/м, $K_{x,3} = 1,75 \cdot 10^{-4}$ рад/м, $K_{x,4} = 2,6 \cdot 10^{-3}$ рад/м). Лагранжево смещение частиц S_L , полученное интегрированием их скорости $u_L' = \partial S_L / \partial t$, можно представить в виде:

$$S_L = w_1^{-1} V_1(z_1) \sin(w_1 t) + w_2^{-1} V_2(z_1) \sin\left(w_2 t + \frac{\pi}{8}\right) + w_3^{-1} V_3(z_1) \sin\left(w_3 t + \frac{\pi}{4}\right) + w_4^{-1} V_4(z_1) \sin\left(w_4 t + 3\frac{\pi}{8}\right) \quad (4)$$

При переходе в эйлерову систему координат, с учётом попадания в фиксированную точку в разные моменты времени t частиц среды, отстоящих от этой точки на расстоянии смещения частиц S_L можно записать эйлерову горизонтальную скорость:

$$V_E = V_1(z_1) \cos(w_1 t + K_{x,1} S_L) + V_2(z_1) \cos\left(w_2 t + K_{x,2} S_L + \frac{\pi}{8}\right) + V_3(z_1) \cos\left(w_3 t + K_{x,3} S_L + \frac{\pi}{4}\right) + V_4(z_1) \cos\left(w_4 t + K_{x,4} S_L + 3\frac{\pi}{8}\right) \quad (5)$$

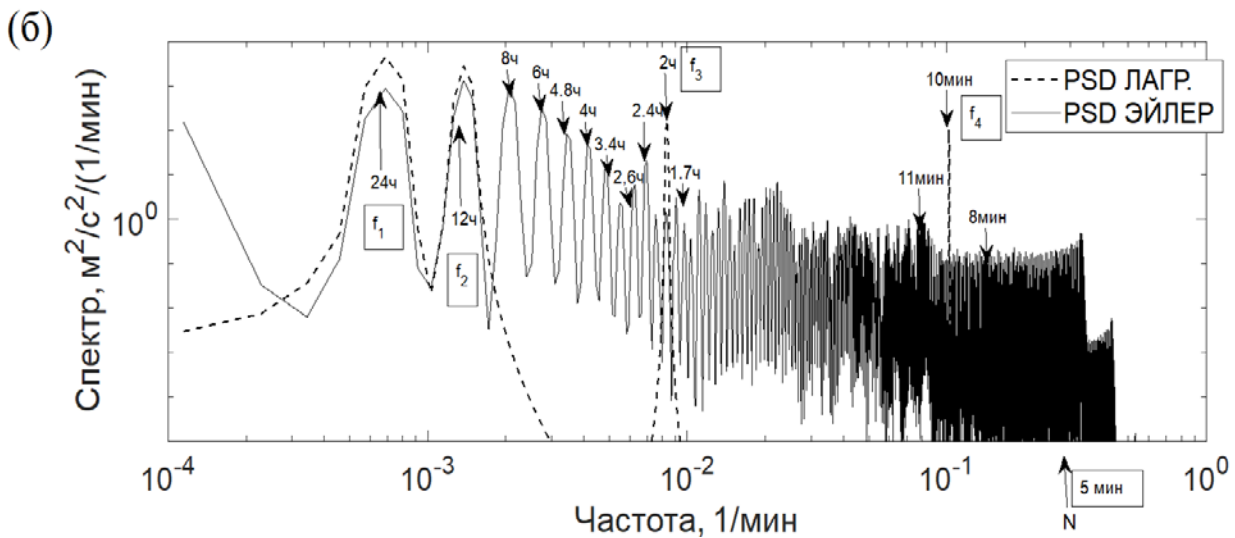
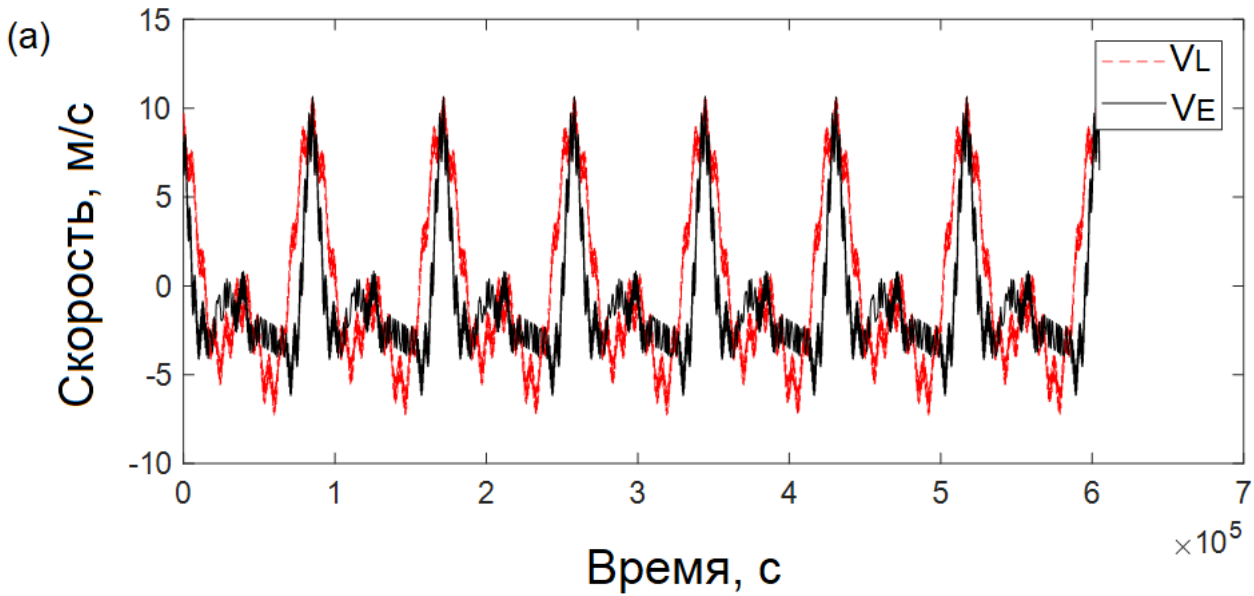


Рис. 6. Временные колебания скорости частиц среды с начальной координатой $a = 0, b = 0, c = z_1$ (красная линия) и эйлеровой скоростью среды в т. $x = 0, y = 0, z = z_1$ (чёрная линия) (а), и соответствующие спектры этих колебания (б).

Влияние нелинейных эффектов адвекции каждой волны в суммарном поле всех волн приводит к появлению в эйлеровом спектре скорости множественных комбинационных гармоник 4-х лагранжевых колебаний с суммарными и разностными частотами, ряд которых указан на рис.6 а, б. Среди них есть низкочастотные гармоники с частотами f_1+f_2 (соответствующий период 8ч.), $2f_1+f_2$ (период 6ч), f_1+2f_2 (период 4,8 ч), $2f_1+2f_2$ (период 4ч), $2f_1+3f_2$ и $3f_1+2f_2$ (период 3 - 3,4 ч), и гармоники с более высокими суммарными и разностными частотами: f_3-f_2 (период 2,4 ч), $f_3-f_2-2f_1$ (период 3 ч), f_3+f_2 (период 1.7 ч), f_4-f_3 (период 11 мин.), f_4+f_3 (период 9 мин.) и др.

Обобщая всё вышесказанное, в главе 4 установлена связь между спектрами флуктуаций горизонтальной скорости ветра, температуры и концентрации примесей. Показано, что спектры пульсаций температуры $S(\omega)$ и концентрации газовых примесей $Q(\omega)$ могут быть выражены через спектр флуктуаций горизонтальной скорости $V(\omega)$, что обусловлено вызванными ВГВ вертикальными смещениями частиц воздуха в устойчиво-стратифицированной тропосфере.

Таким образом, индуцируемая волнами и приливами адвекция является ключевым механизмом, формирующим наблюдаемые спектры флуктуаций метеопараметров, концентрации CO_2 и турбулентных потоков. Этот механизм объясняет как появление дискретного набора периодов, так и расширение спектра в сторону высоких частот, превышающих частоту Вайсяля-Брента.

В заключении диссертации представлены основные результаты исследования мезомасштабных процессов в атмосфере и в океане, таких как внутренние волны и вихри, а также механизма генерации внутренних волн вихрями и влияния внутренних волн на тепло- и газообмен с атмосферой.

Основные результаты работы:

- Разработана модель генерации короткопериодных внутренних волн субмезомасштабным вихрем в слое термоклина, с помощью которой объяснены наблюдаемые на спутниковых снимках радиолокаторов синтезированной апертуры (РСА) формы и периоды мелкомасштабных полосатых спиралевидных структур (периоды порядка 100 м) на периферии вихря. Модельные расчеты форм спиралевидных гребней внутренних волн и их длин волн были проведены с использованием данных реанализа скорости течения в вихревых структурах и полученных профилей частоты Брента-Вайсяля для слоя термоклина вблизи поверхности океана в районе нахождения вихря. Из сравнения модельных расчетов с изображением на снимке мелкомасштабной спиралевидной структуры было показано, что эти структуры могут быть проявлением внутренних волн с длинами волн по-

- рядка 100 м, генерируемых вихрем в устойчиво-стратифицированном слое термоклина из-за адвекции турбулентных неоднородностей плотности круговым течением вихря.
- Установлена статистически значимая связь между параметрами внутренних волн в Карском море и вариациями метеопараметров и турбулентных потоков тепла и импульса в приводном слое атмосферы. Эта связь подтверждена статистически значимыми максимумами когерентности, достигающими значений 0,6, между колебаниями температуры воды на глубинах 10–20 м и флуктуациями атмосферного давления, скорости ветра и температуры воздуха на периодах 4–15 мин, 18–20 мин, 35 мин, 1–3 ч и 4,7 ч.
 - Показано, что нелинейный процесс адвекции частиц среды, вызванный внутренними волнами, приводит к модуляции атмосферного давления, скорости ветра и турбулентного потока импульса в приводном слое атмосферы на определенных дискретных периодах. Этот процесс формирует частотные спектры флуктуаций температуры воды и влияет на их когерентность с флуктуациями метеопараметров приводного слоя атмосферы. Наблюдаемая модуляция вертикальных турбулентных потоков тепла и импульса относительно их средних значений достигала 40 % на периодах в 2-3 ч и возрастала с увеличением периода модуляции.
 - По данным измерений флуктуаций скорости ветра, температуры воздуха и атмосферного давления на трех метеорологических станциях вблизи станции Прогресс в Антарктиде методом когерентного анализа были выявлены внутренние гравитационные волны в определенные промежутки времени и определены их периоды, горизонтальные фазовые скорости и направления распространения. Фазовые скорости (0,5 - 6 м/с) были сравнимы по величине с амплитудами колебаний скорости ветра (0,5 – 1 м/с), что указывало на нелинейный характер распространения ВГВ.
 - Установлен общий дискретный набор периодов модуляции (от 20 мин до суток) метеопараметров, концентрации CO₂ и турбулентных потоков в приводном слое атмосферы, связанных с внутренними гравитационными волнами разных периодов в атмосфере и их нелинейными гармониками.
 - Предложен нелинейный механизм возникновения общих доминантных периодов колебаний в диапазоне от суток до десятков минут в наблюдаемых временных вариациях метеопараметров, концентрации CO₂ и турбулентных потоков импульса и тепла. Показано, что переменная адвекция частиц среды, вызванная суммарным полем внутренних волн, включая волны от солнечного терминатора, солнечных суточных и полусуточных приливов, и случайных источников (орография, атмосферные фронты, конвекция, тропосферные струйные течения и другие), приводит к модуляции фазы каждой волны в эйлеровой системе координат. Нелинейный процесс адвекции генерирует многочисленные суммарные и разностные гармоники волн, чем объясняется появление дискретных спектральных максимумов во временных вариациях метеопараметров, концентрации CO₂ и турбулентных потоков.

В работе предложена единая физическая концепция, согласно которой переменная адвекция частиц среды в суммарном поле внутренних волн (включая волны от солнечного терминатора, суточных и полусуточных приливов, сейсмогравитационных колебаний, а также случайных источников) является доминирующим механизмом формирования дискретных спектральных максимумов в диапазоне от десятков минут до суток. Этот механизм проявляется как в океане (Глава 2), так и на границе океан-атмосфера (Глава 3) и в атмосфере (Глава 4), что подтверждает его универсальность.

Публикации по теме диссертации в журналах из Перечня ВАК:

1. Марчук Е.А., Чунчузов И.П., Репина И.А., Йоханнессен У.М. Анализ параметров и механизма генерации внутренних волн субмезомасштабным вихрем в районе Мозамбикского пролива // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58, № 6. С. 706–719. DOI: 10.31857/S0002351522060104
2. Марчук Е.А., Чунчузов И.П., Попов О.Е., Репина И.А., Козлов И.Е., Сильвестрова К.П., Осадчиев А.А., Степанова Н.Б., Йоханнессен У.М. Исследование характеристик внутренних волн в Карском море и их влияния на турбулентные потоки тепла и импульса над морской поверхностью // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2024. Т. 60. № 5. С. 582–600. DOI: 10.31857/S0002351524050029
3. Марчук Е.А., Чунчузов И.П., Репина И.А., Иванов Б.В., Безгрешнов А.М. Связь концентраций CO₂ вблизи Восточной Антарктиды с метеорологическими условиями и атмосферными волновыми процессами // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2025. Т. 61. № 4. С. 519 – 537. DOI: 10.7868/S3034648725040086
4. Sandalyuk N., Khachatryan E., Marchuk E. Automatic eddy detection in Antarctic marginal ice zone using Sentinel-1 SAR data. // Front. Mar. Sci. 2025. 12:1648021. doi: 10.3389/fmars.2025.1648021.

Другие публикации по теме диссертации:

- 1) Марчук Е.А., Чунчузов И.П., Репина И.А., Иванов Б.В., Безгрешнов А.М. Динамика концентрации углекислого газа в Южном полушарии по данным 68 РАЭ // XXI научная школа «Нелинейные волны – 2024». С. 151. Нижний Новгород, 2024.
- 2) Марчук Е.А., Чунчузов И.П., Попов О.Е., Репина И.А., Козлов И.Е., Сильвестрова К.П., Осадчиев А.А., Степанова Н.Б., Йоханнессен У.М. Исследование характеристик внутренних волн в Карском море и их влияния на турбулентные потоки тепла и импульса над морской поверхностью // Комплексные исследования Мирового океана. С. 165-166. Владивосток, 2024.
- 3) Марчук Е.А., Чунчузов И.П., Репина И.А., Иванов Б.В., Безгрешнов А.М. Динамика концентрации углекислого газа в южном полушарии по данным 68-й Российской антарктической экспедиции // Моря России. С. 285-286. Севастополь, 2024.

- 4) Марчук Е.А., Иванов Б.В., Безгрешнов А.М., Ивлев М.О. Анализ теплобалансовых и ледовых наблюдений в сезон 68-й Российской антарктической экспедиции // Моря России. С.91-92. Севастополь, 2023.
- 5) Марчук Е.А., Репина И.А., Козлов И.Е., Сильвестрова К.П., Осадчиев А.А., Степанова Н.Б. Анализ температуры поверхности Карского моря на основе спутниковых данных и данных экспедиции "Плавучий университет-2021"// Моря России. С.93-53. Севастополь, 2023.
- 6) Марчук Е.А., Репина И.А., Козлов И.Е., Сильвестрова К.П., Осадчиев А.А., Степанова Н.Б. Анализ температуры поверхности Карского моря на основе спутниковых данных и данных экспедиции «Плавучий Университет-2021» // Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий». – С. 63-65. Майкоп, 2023.