

На правах рукописи

Марчук Екатерина Артемовна

**Процессы генерации мезомасштабных внутренних волн в системе океан-атмосфера и их
влияние на тепло- и газообмен между атмосферой и океаном**

Специальность 1.6.18 —

«Науки об атмосфере и климате»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой

степени кандидата физико-математических наук

Москва - 2025

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

Зимин Алексей Вадимович,
доктор географический наук,
Санкт-Петербургский филиал Федерального государственного
учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук, главный научный сотрудник

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

Защита состоится 4 марта 2026 года в 12:00 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 «__» января 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 мезомасштабных процессов в атмосфере и океане, механизмов генерации внутренних волн вихрями и оценке влияния внутренних волн в океане и внутренних гравитационных волн в атмосфере на тепло- и газообмен между атмосферой и океаном.

Актуальность исследования. Изучение внутренних волн в океане (ВВ) и внутренних гравитационных волн в атмосфере (ВГВ) имеет одновременно фундаментальное и прикладное значение, так как они играют ключевую роль в переносе энергии, импульса и вещества в обеих средах.

В океане ВВ действуют на вертикальное перемешивание, трансформацию водных масс, влияют на динамику и стратификацию, что важно для подводной акустики и безопасности мореплавания. Верхние слои океана наиболее активно задействованы в процессах тепло- и газообмена между атмосферой и океаном. Таким образом, понимание процессов, вызывающих изменение перемешанного слоя, имеет первостепенное значение для моделирования обменных процессов.

Особый интерес для исследования представляет генерация внутренних волн океаническими вихрями, которая активно изучается с помощью моделирования, однако его прямые натурные наблюдения остаются единичными. В связи с этим анализ спутниковых снимков для одновременного выявления вихрей и внутренних волн является актуальной задачей, позволяющей исследовать механизм генерации и установить связь между параметрами ВВ (длин волн, формы гребней и их фазовой скорости распространения) и параметрами самого вихря (масштаб, азимутальная скорость течения и ее сдвиги).

Несмотря на значительный прогресс, достигнутый к настоящему времени в исследовании характеристик внутренних волн в арктических морях спутниковыми и контактными методами, влияние внутренних волн на процессы обмена теплом и импульсом между атмосферой и океаном почти не исследовалось.

В атмосфере ВГВ переносят энергию из тропосферы в верхние слои атмосферы, воздействуя на атмосферную циркуляцию, термический режим, генерацию вторичных волн и турбулентность.

ВГВ вызывают почти периодические смещения частиц воздуха и ее компонент 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. Помимо этого, конвективные и сдвиговые неустойчивости ВГВ приводят к обрушению волн и генерации турбулентности, которая оказывает влияние на турбулентную диффузию примесей.

В настоящее время большое внимание мировой общественности направлено на исследование углекислого газа CO₂, концентрация которого в атмосфере Земли неуклонно растёт последние десятилетия. Следует отметить, что роль мезомасштабных атмосферных процессов в изменчивости концентраций углекислого газа в приводном слое атмосферы полярных регионах не рассматривалась до настоящего времени. При этом необходимо учитывать, что наряду с фотохимическими и радиационными процессами, существенное влияние на пространственно-временную изменчивость концентраций газовых примесей в атмосфере и, в частности CO₂, оказывают атмосферные волновые процессы разных пространственно-временных масштабов, включая волны Россби, волны Кельвина и внутренние гравитационные волны. Тем не менее, на сегодняшний день не опубликованы работы, посвященные влиянию ВГВ на концентрацию углекислого газа в приводном слое атмосферы.

Еще одним важным моментом является необходимость улучшения глобальных и региональных моделей климатической системы. Мезомасштабные процессы, к которым относятся ВГВ, характеризуются пространственными масштабами, малыми по сравнению с разрешающей способностью сеток глобальных моделей, в связи с чем их влияние может быть учтено посредством параметризаций. Мезомасштабные процессы также играют значимую роль в системе обратных связей между океаном и атмосферой, модулируя теплообмен и процессы вихреобразования, что обуславливает потребность в разработке связанных моделей, учитывающих одновременно как атмосферные, так и океанические процессы с достаточно высоким разрешением.

Наконец, понимание характеристик и механизмов генерации некоторых мезомасштабных процессов позволяет лучше представлять гидро- и биохимические процессы в океане. Так, роль мезомасштабных вихрей в переносе тепла и питательных веществ в океане является активной областью исследований.

Таким образом, мезомасштабные явления требуют экспериментальных и теоретических исследований динамики и механизмов их формирования и взаимодействия с другими процессами с целью параметризаций этих явлений в моделях Земной системы.

Цель работы - изучение механизмов генерации внутренних волн (ВВ) в океане и влияния внутренних волн в океане и внутренних гравитационных волн в атмосфере на турбулентные потоки тепла, импульса и углекислого газа с использованием результатов спутниковых и натурных наблюдений.

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

- 1) Исследовать механизм генерации внутренних волн (ВВ) в океане субмезомасштабными вихрями;
- 2) Исследовать влияние ВВ в океане на флуктуации давления, температуры, скорости ветра и турбулентные потоки тепла и импульса в приводном слое атмосферы;
- 3) Исследовать влияние внутренних гравитационных волн (ВГВ) в атмосфере на вертикальные турбулентные потоки тепла и импульса через поверхность океана;
- 4) Исследовать влияние ВГВ на концентрацию СО₂ в приводном слое атмосферы полярных районов.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) Генерация внутренних волн субмезомасштабными вихрями проявляется в виде спиралевидных структур на периферии субмезомасштабных вихрей на спутниковых снимках в радиолокационном диапазоне и подтверждается анализом их форм и периодов.
- 2) Внутренние волны, распространяющиеся в слое термоклина в океане, вызывают в приводном слое атмосферы временные колебания значений 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 ч).
- 3) Внутренние гравитационные волны в атмосфере модулируют турбулентные потоки тепла и импульса на границе океан-атмосфера в широком диапазоне периодов (от десятков минут до нескольких часов), что проявляется в наблюдаемых временных осцилляциях турбулентных потоков тепла, импульса и метеопараметров с соответствующими дискретными периодами (27, 40, 50 мин, 2 ч, 3 ч, 6 ч).
- 4) Внутренние гравитационные волны и их нелинейные взаимодействия формируют специфическую "гребенчатую" структуру частотных спектров флуктуаций температуры, концентрации углекислого газа и турбулентных потоков тепла и импульса в приводном слое атмосферы.

Научная новизна исследования:

- Экспериментально подтверждена теоретически обоснованная ранее генерация ВВ субмезомасштабными вихрями в районе Мозамбикского течения.
- Впервые предложена модель формирования спиралевидных волновых гребней ВВ, объясняющая наблюдаемые формы и периоды полосатых спиралевидных структур на спутниковых снимках (PCA – радиолокаторы синтезированной апертуры).
- 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).
- Впервые предложен возможный резонансный механизм взаимодействия внутренних волн в слое термоклина с определенными спектральными компонентами флюктуаций атмосферного давления, для которых частоты и горизонтальные скорости распространения совпадают с соответствующими частотами и горизонтальными фазовыми скоростями внутренних гравитационных мод в слое термоклина.
- Впервые установлено влияние ВВ в широком диапазоне периодов, общих для океанических и атмосферных внутренних волн, на турбулентные потоки тепла и импульса через поверхность океана.
- Впервые разработана модель влияния индуцируемой атмосферными ВГВ и приливами адвекции частиц воздуха на формирование наблюдаемых спектров флюктуаций метеопараметров с присущей им “гребенчатой” формой, состоящей из большого числа спектральных максимумов.
- Впервые предложена модель связи частотных спектров флюктуаций температуры и концентраций примесей, вызванных ВГВ в атмосфере, со спектром флюктуаций горизонтальной скорости ветра.

Теоретическая и практическая значимость. Разработанная модель генерации спиралевидных ВВ субмезомасштабным вихрями необходима для лучшего понимания механизмов образования ВВ в океане. В свою очередь, изучение характеристик и динамики ВВ может помочь в обеспечении безопасности подводного мореплавания и строительства. 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 океанических ВВ на турбулентные потоки импульса и тепла, а также на метеоэлементы (давление, скорость ветра и температуры воздуха) и

концентрацию углекислого газа вблизи поверхности моря могут найти практическое применение в разработке параметризации процессов взаимодействия океана и атмосферы в моделях прогноза погоды и климата.

Исследование частотных спектров флюктуаций температуры и концентрации примесей позволяет расширить теоретические знания о механизмах мезомасштабной изменчивости концентраций парниковых газов в атмосфере и нелинейном взаимодействии волновых процессов в атмосфере.

Полученные результаты могут также служить в качестве экспериментальной базы, необходимой 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 подтверждается публикациями в ведущих профильных рецензируемых журналах и выступлениями на профильных конференциях.

Апробация работы. Основные результаты, изложенные в диссертации, были представлены на 23 международных и всероссийских научных конференциях и семинарах:

Х Международная научно – практическая конференция «Исследования и образование MARESEDU - 2021» (Москва, 25-29 октября 2021); XIX Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 25-29 ноября 2021); XVIII Большой Географический Фестиваль (Санкт-Петербург, 8-10 апреля 2022 г.); Arctic Observing Summit 2022 (Тромсё, Норвегия, 30 марта – 1 апрель 2022); VII Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий» (Майкоп, 15 – 19 мая 2023); Конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде «CITES - 2023» (Москва, 13-16 июля 2023); 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); VIII Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (13-17 мая 2024, 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 Научной школе «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 он является первым автором, и части статьей, опубликованных в соавторстве, а также представлены результаты работы в научных докладах и на конференциях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 статьи в отечественных рецензируемых журналах, 3 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 помошь 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 помошь 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 помошь в экспериментальных исследованиях в Антарктике и полезные советы.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка условных сокращений, списка использованных источников из 238 наименований. В ней содержится 112 страниц, 1 таблица и 33 рисунка.

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 первой главе 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 отклонении выделенной частицы среды от положения статического 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-Вийсяля и инерционной частотой (или параметром Кориолиса). Распределение энергии внутренних волн по их волновым числам и частотам хорошо описывается эмпирическим спектром Гарретта-Мунка.

В литературе описано большое количество механизмов генерации ВВ, перечисленных выше. При этом механизм генерация 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 углекислого газа 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.

Глава 2 посвящена исследованию связи между параметрами субмезомасштабных вихрей (характерными размерами, азимутальной скоростью) и характеристиками спиралевидных

структур вокруг вихрей, выявленных с использованием РСА снимков, с целью объяснения возможного механизма генерации этих структур.

В качестве района исследования выбран район к северу от Мозамбикского пролива, где располагается Мозамбикское течение. Оно является частью большого течения Агульс, которое известно своим интенсивным вихреобразованием на разных масштабах и наличием данных гидрофизических наблюдений.

Всего было проанализировано около тысячи РСА-снимков спутника Sentinel – 1A за период с 2014 до 2017 года и выявлено два подходящих для дальнейшего анализа случая формирования субмезомасштабных вихрей, генерирующих спиралевидные полосы. С целью поиска четких проявлений вихрей и определения их границ была использована методика выделения вихрей на поверхности океана, описанная в работе Митягина и Лавровой.

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, содержащими более мелкомасштабные полосы с периодом порядка 100 м (рис.1). Расстояние между ближайшими спиралевидными полосами растёт при удалении от центральной части вихря.

При увеличении одной из светлых полос, через которую проходит линия профиля, заметно «расщепление» этой полосы на более тонкие светлые и темные полосы с периодом ~ 100 м. Предполагается, что эти тонкие светлые и темные полосы с малыми (порядка 100 м) расстояниями между ними являются проявлением внутренних волн. Оценка пространственных вариаций волнового поля выполнена на основе анализа интенсивности отраженного радиосигнала $W(r)$ и его горизонтального спектра. На графике $W(r)$ выявлены квазипериодические колебания с преобладающим периодом ~ 1500 м. Спектральный анализ показал четкие максимумы на волновых числах, соответствующих горизонтальным масштабам 3 км, 2.4 км и 1.6 км, что хорошо согласуется с измеренными расстояниями между спиралевидными полосами на снимке вихря. Наряду с этими максимумами был обнаружен также более слабый по амплитуде спектральный максимум на горизонтальном масштабе порядка 100 м, близкий к расстояниям между тонкими полосами.

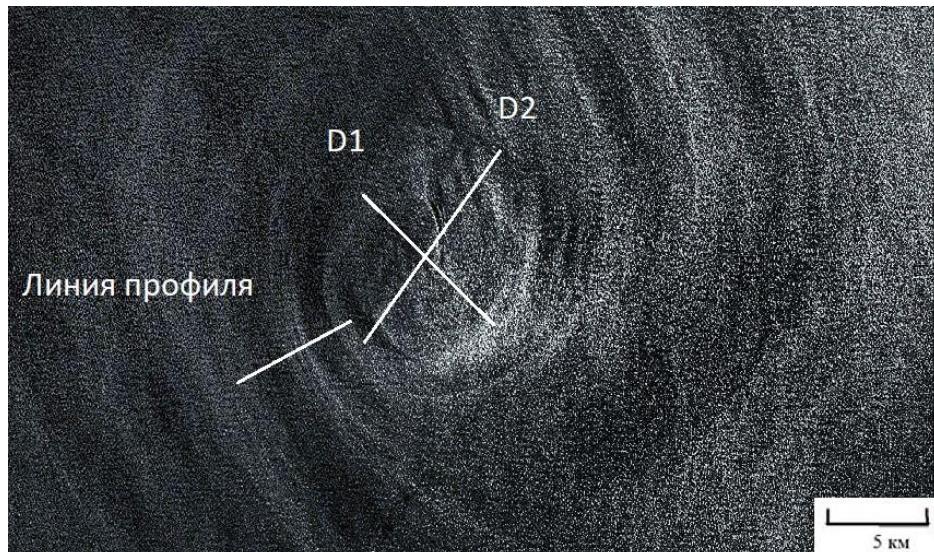


Рис.1. Вихрь, наблюдающийся 22 сентября 2017 года. Линии D1 и D2 являются диаметрами вихря. Вдоль линии профиля построена зависимость отражённого сигнала от расстояния.

Еще один субмезомасштабный вихрь диаметром ~ 5 км с чёткой спиралевидной полосатой структурой антициклонической направленности был зафиксирован 25 сентября 2017 г. вблизи острова Нгазиджа. Для анализа его структуры были построены профили интенсивности отраженного сигнала $W(r)$ и их спектры вдоль трех направлений, выявившие наличие квазипериодических вариаций с масштабами от сотен метров до нескольких километров.

Для объяснения наблюдаемых спиралевидных структур была разработана усовершенствованная модель генерации внутренних волн, основанная на модели адвекции турбулентных неоднородностей плотности круговым течением вихря с числом Россби $Ro \gg 1$. Модель предполагает движение источника возмущений со скоростью $V=0.3$ м/с по круговой траектории радиусом $R=1$ км в тонком устойчиво-стратифицированном слое термоклина в трёхслойной модели океана. Также в модели есть два ключевых предположения: наличие слоя с высокой статической устойчивостью ($N \sim 19$ циклов/ч) для волноводного распространения ВВ и то, что течение в вихре является изначально турбулентным и содержит случайные неоднородности скорости течения, температуры и плотности разных горизонтальных и вертикальных масштабов.

При прямолинейном движении источника (неоднородности с более высокой плотностью по сравнению со средней плотностью окружающей среды) со скоростью, превышающей фазовые скорости внутренних гравитационных мод в термоклине 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-Вяйсяля 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 волн моделируемых внутренних волн.

Разработана модель генерации спиралевидных внутренних волн субмезомасштабными вихрями, которая объясняет наблюдаемые формы волновых гребней волнового поля и его длины волны. На основании выявленных на спутниковых РСА снимках субмезомасштабных вихрей в Мозамбикском проливе за 22 и 25 сентября 2017 года показано, что спиралевидная форма полос на снимке вихря и характерные масштабы вариаций интенсивности отраженного сигнала в зависимости от расстояния от центральной части вихря объясняются формой волновых линий (гребней) внутренних волн, генерируемых в устойчиво-стратифицированном слое термоклина океана турбулентными неоднородностями плотности (или температуры), движущимися вместе с круговым вихревым течением.

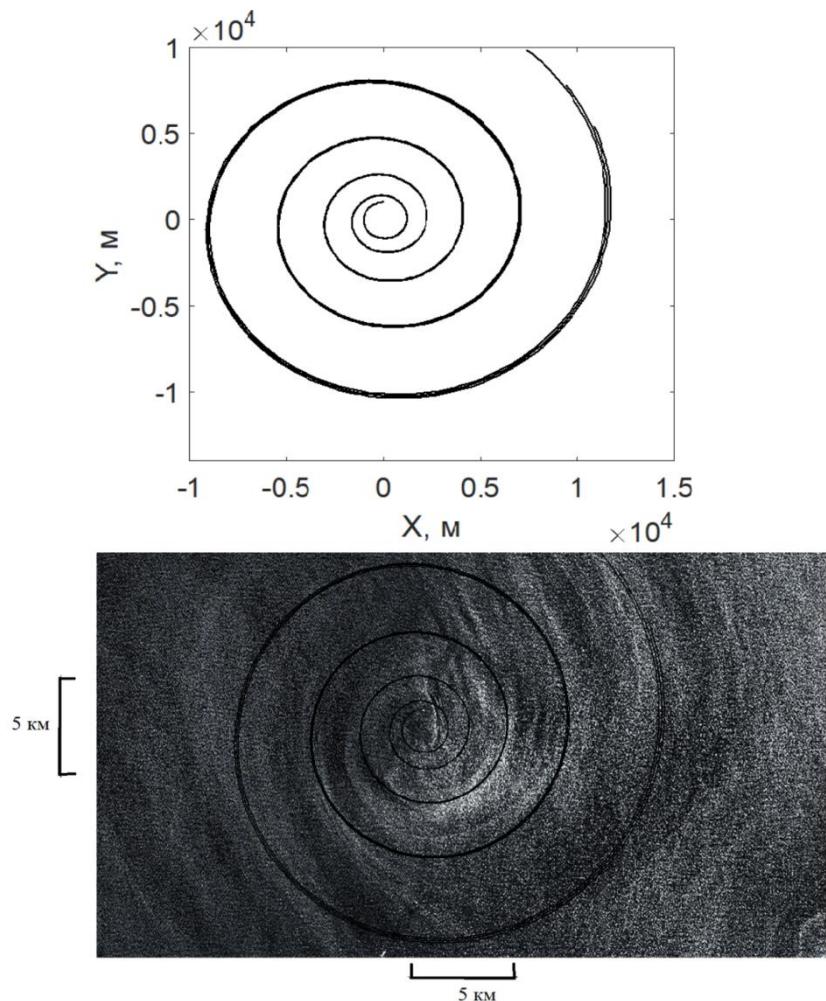


Рис.2. Расчет формы волновых линий от движущегося источника внутренних волн с азимутальной скоростью $V = 0.3$ м/с на расстоянии $r = 1$ км от центра вихря (вверху) и сравнение расчетной формы волновых линий со спиралевидной полосатой структурой вихря на снимке (внизу).

Проведенный здесь анализ двух снимков субмезомасштабных вихрей указывает на возможность генерации внутренних волн этими вихрями вне зависимости от направления циркуляционного течения внутри них (циклонического или антициклонического).

В главе 3 проведено исследование характеристик ВВ в океане и их влияние на метеорологические поля (атмосферное давление, температура воздуха, скорость ветра, влажность) и турбулентные потоки тепла и импульса над морской поверхностью.

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.

Когерентный анализ данных измерений трех разнесенных термокос, зарегистрировавших 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 (~ 0.15 м/с) волн относительно судна. Учет дрейфа показал их распространение на северо-восток с групповой скоростью ~ 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.

Кросс-спектральный анализ данных, полученных 12.08.2021 г., выявил наличие общих спектральных максимумов на периодах ~ 4 , 10, 18 и 35 минут между флуктуациями температуры воды на глубинах 10 м и 20 м, температуры поверхности моря (ТПО), а также атмосферного давления, скорости ветра и температуры воздуха на высоте 22 м (рис.3). Эти периоды соответствуют диапазону захваченных высокочастотных внутренних волн, способных распространяться в волноводном слое термоклина Карского моря.

Наличие общих периодов колебаний в океане и атмосфере указывает на возможное резонансное взаимодействие внутренних волн в термоклине с атмосферными гравитационными волнами в устойчиво-стратифицированном приземном слое. Это взаимодействие обусловлено тем, что ВВ вызывают вертикальные смещения частиц среды и флуктуации атмосферного давления у поверхности, раздела вода-воздух, которые, в соответствии с граничным условием, могут возбуждать атмосферные волны при совпадении их частот и фазовых скоростей:

$$\rho \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} \frac{\partial w}{\partial z} + f^2 \frac{\partial w}{\partial z} - g \Delta_{\perp} w \right)_{z=0} = \frac{\partial \Delta_{\perp} p_a}{\partial t} \quad (3)$$

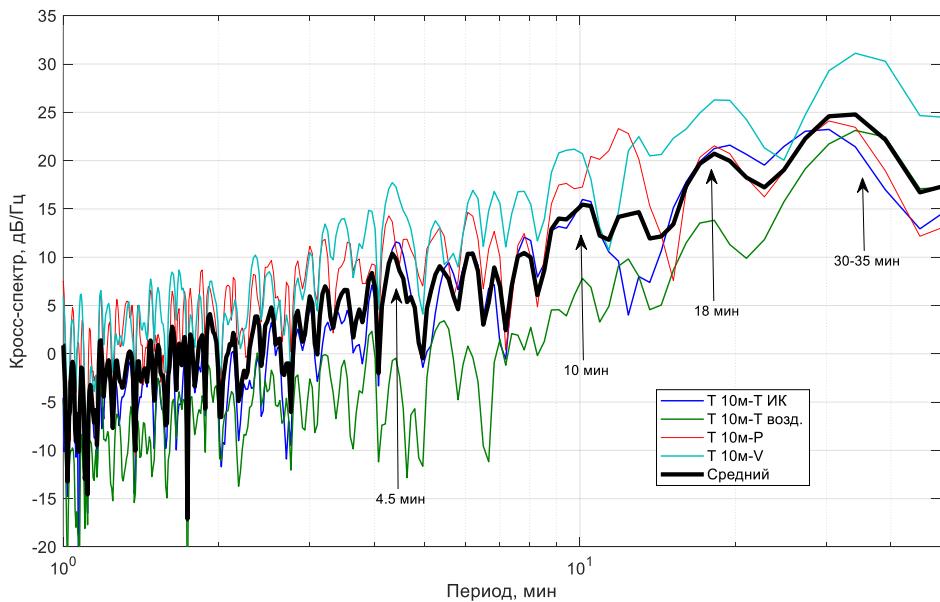


Рис.3. Взаимные кросс-спектры между флюктуациями температуры воды на высоте 10 м (T_{10}) и атмосферного давления (Р), температуры T_{10} и скорости ветра (V), температуры T_{10} и температуры поверхности океана (Тик), температуры T_{10} и температуры воздуха (Твозд), и средний кросс-спектр для указанных выше 4-х кросс-спектров (жирная черная кривая), где $\Delta_{\perp} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ – лапласиан в горизонтальной плоскости, f – параметр Кориолиса, g – ускорение силы тяжести.

Оценка амплитуды вертикальной скорости (~ 0.1 м/с) по наблюдаемым колебаниям температуры и профилю частоты Брента-Вяйсяля подтверждает возможность генерации внутренними волнами заметных возмущений в приповерхностном слое атмосферы. Низкие фазовые скорости высокочастотных атмосферных гравитационных мод (2 - 2.5 м/с) создают возможность для выполнения резонансных условий с внутренними волнами в океане.

Короткопериодные внутренние волны в слое термоклина наблюдались и в другие дни, в частности, 23.08.2021 г. и 24.08.2021 г. Для этих дней были проанализированы не только вариации метеопараметров, как для 12.08.2021 г., но и их связь с временными вариациями турбулентных потоков тепла и импульса в приводном слое атмосферы.

Анализ данных за 23 – 24 августа 2021 года (рис.4) выявил мезомасштабные вариации турбулентных потоков явного (QH) и скрытого тепла (QL), а также динамической скорости (u^*), которые хорошо коррелировали с изменениями скорости ветра и разности температур океан-атмосфера. Спектральный анализ показал наличие устойчивых спектральных

максимумов на периодах 20 мин, 25 мин, 35 мин, 1 ч, 3 ч и 4.7 ч в спектрах как динамической скорости, так и потоков тепла.

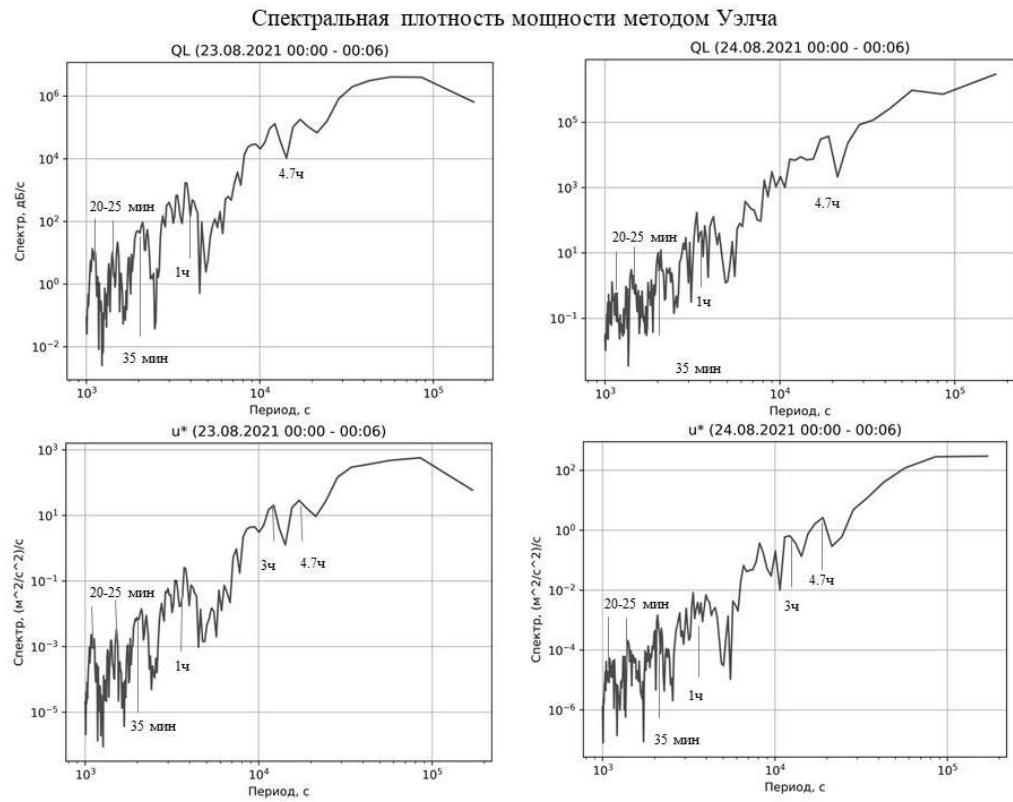


Рис.4. Временные спектры вариаций динамической скорости u^* и турбулентных потоков тепла Q_L , полученных 23 августа (слева) и 24 августа (справа) 2021 г. с 00:00 до 06:00 UTC.

Наблюдаемый определенный дискретный набор периодов вариаций турбулентных потоков может генерироваться разными источниками ВВ. Это позволяет предположить, что внутренние волны в океане и атмосфере, модулируя вертикальные сдвиги скорости ветра и температурные градиенты, оказывают существенное влияние на мезомасштабную изменчивость турбулентных потоков тепла и импульса вблизи поверхности океана, что важно учитывать при параметризации процессов взаимодействия в системе атмосфера-оcean.

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 , 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 (Табл. 1).

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

Таблица 1. Стоянки судна «Академик Фёдоров» на антарктических станциях в ходе 68 и 69 РАЭ

Даты	Кол-во дней	Стоянка судна	РАЭ
02 — 12 января 2023 г	10	станции Прогресс (1)	68
17 — 27 января 2023 г	10	станции Мирный	68
02 — 20 февраля 2023 г	18	станции Прогресс (2)	68
02 — 14 декабря 2023 г	12	станции Прогресс (3)	69

Спектральный анализ данных, полученных во время стоянки у станций Прогресс и Мирный, выявил наличие общих доминантных периодов (~27 мин, 40 мин, 50 мин, 2 ч, 3 ч, 6 ч) в вариациях концентрации CO_2 , температуры поверхности океана (ТПО), скорости ветра, температуры воздуха, а также турбулентных потоков явного (QH) и скрытого тепла (QL) и потока импульса (τ). Статистически значимая повторяемость этих периодов подтверждена анализом повторяемости значимых спектральных максимумов за каждый день измерений для всех периодов измерений (50 дней). Анализ гистограмм распределения числа спектральных максимумов по соответствующим им периодам показал, что наиболее часто встречаются колебания в диапазоне периодов 1 - 3 ч.

Кросс-спектральный анализ показал высокую когерентность колебаний на указанных выше доминантных периодах между вариациями ТПО и концентрации CO_2 , а также между концентрацией CO_2 и параметром стратификации R (рис. 5). Это указывает на синхронный характер изменчивости метеопараметров, турбулентных потоков и концентрации углекислого газа.

Наблюдаемая дискретная периодичность соответствует характерным периодам внутренних гравитационных волн и атмосферных приливов. Анализ более длительных рядов данных выявил также низкочастотные колебания с периодами 3 сут., 2 сут. и 1 сут., 10 ч. и 6 ч. Часть из них, с периодами порядка суток и менее, типична для суточных и полусуточных приливов и волн, генерируемых солнечным терминатором. Периоды порядка 2 сут. и 3 сут. могут быть вызваны волнами планетарного масштаба.

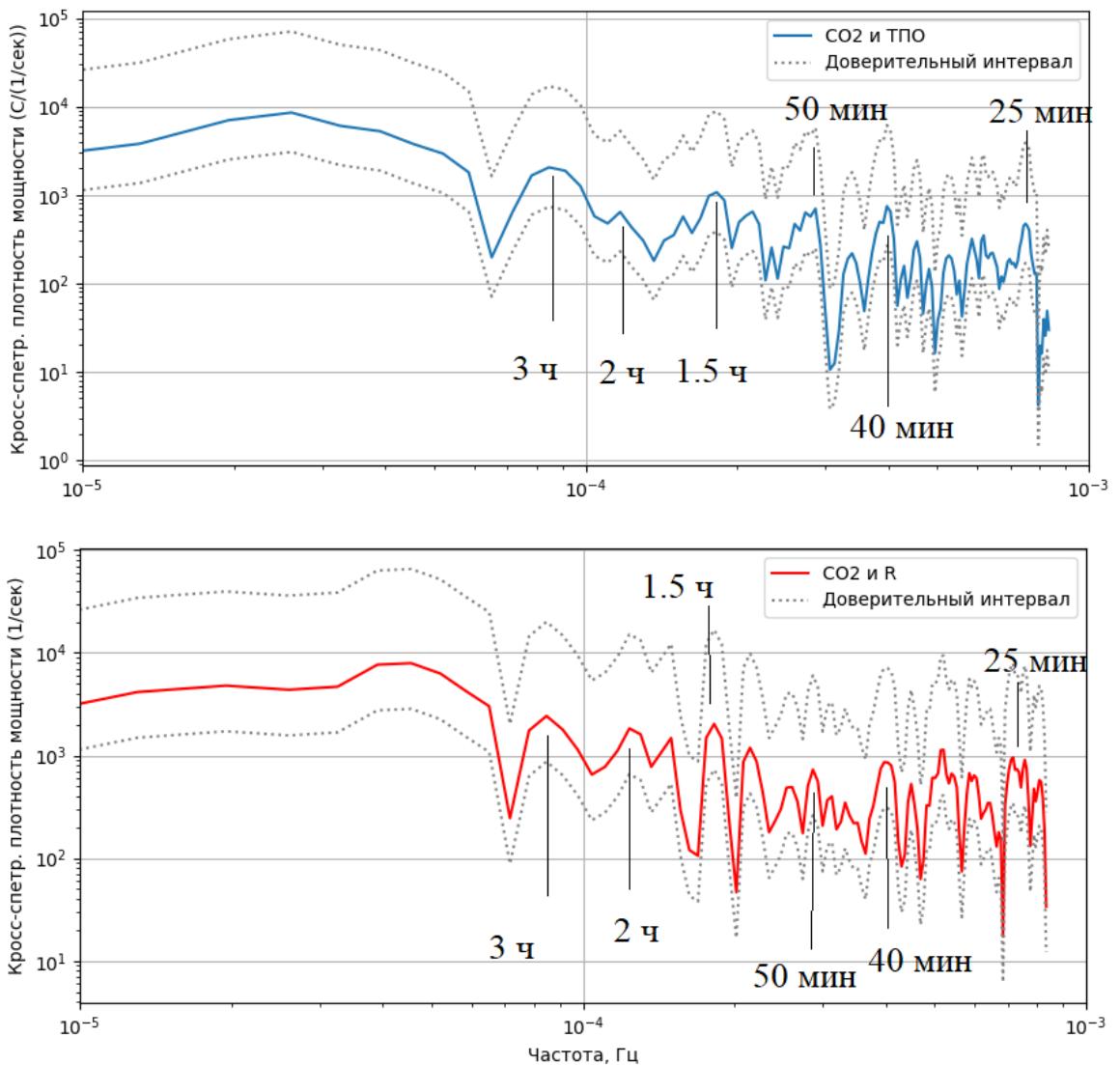


Рис.5. Кросс-спектры между вариациями ТПО и концентраций СО2 (верхняя панель) и между вариациями СО₂ и параметром стратификации R (нижняя панель) за период 02 – 12 января 2023 года в период стоянки судна на станции Прогресс.

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 флюктуаций скорости ветра рассмотрена модель, в которой колебания лагранжевой скорости частицы вызваны четырьмя источниками: суточным приливом ($T_1=24$ ч), солнечным терминатором ($T_2=12$ ч), сейсмо-гравитационными колебаниями Земли ($T_3=2$ ч) и короткопериодными ВГВ ($T_4=10$ мин). Под действием 4-х колебаний происходит смещение частиц среды из их первоначального (невозмущенного волнами) положения с лагранжевой колебательной скоростью:

$$u'_L = V_1(z_1) \cos(w_1 t) + V_2(z_1) \cos\left(w_2 t + \frac{\pi}{8}\right) + V_3(z_1) \cos\left(w_3 t + \frac{\pi}{4}\right) + V_4(z_1) \cos\left(w_4 t + 3\frac{\pi}{8}\right) \quad (4)$$

где V_i (c)- амплитуды колебаний скорости частиц среды в зависимости от их вертикальной координаты c , ($i=1,2,3,4$), а $w_i=2\pi/T_i$ - 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 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:

$$S_L = w_1^{-1} V_1(z_1) \sin(w_1 t) + w_2^{-1} V_2(z_1) \sin\left(w_2 t + \frac{\pi}{8}\right) + w_3^{-1} V_3(z_1) \sin\left(w_3 t + \frac{\pi}{4}\right) + w_4^{-1} V_4(z_1) \sin\left(w_4 t + 3\frac{\pi}{8}\right) \quad (5)$$

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:

$$V_E = V_1(z_1) \cos(w_1 t + K_{x,1} S_L) + V_2(z_1) \cos\left(w_2 t + K_{x,2} S_L + \frac{\pi}{8}\right) + V_3(z_1) \cos\left(w_3 t + K_{x,3} S_L + \frac{\pi}{4}\right) + V_4(z_1) \cos\left(w_4 t + K_{x,4} S_L + 3\frac{\pi}{8}\right) \quad (6)$$

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 $f1+f2$ (соответствующий период 8ч.), $2f1+f2$ (период 6ч), $f1+2f2$ (период 4.8 ч), $2f1+2f2$ (период 4ч), $2f1+3f2$ и $3f1+2f2$ (период 3.4 ч), и гармоники с более высокими суммарными и разностными частотами: $f3-f2$ (период 2.4 ч), $f3-f2-2f1$ (период 2.6 ч), $f3+f2$ (период 1.7 ч), $f4-f3$ (период 11 мин.), $f4+f3$ (период 9 мин.) и др.

А результате, в главе 4 установлена связь между спектрами флюктуаций 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 флюктуаций горизонтальной скорости $V(\omega)$, что обусловлено вызванными ВГВ вертикальными смещениями частиц воздуха в устойчиво-стратифицированной тропосфере.

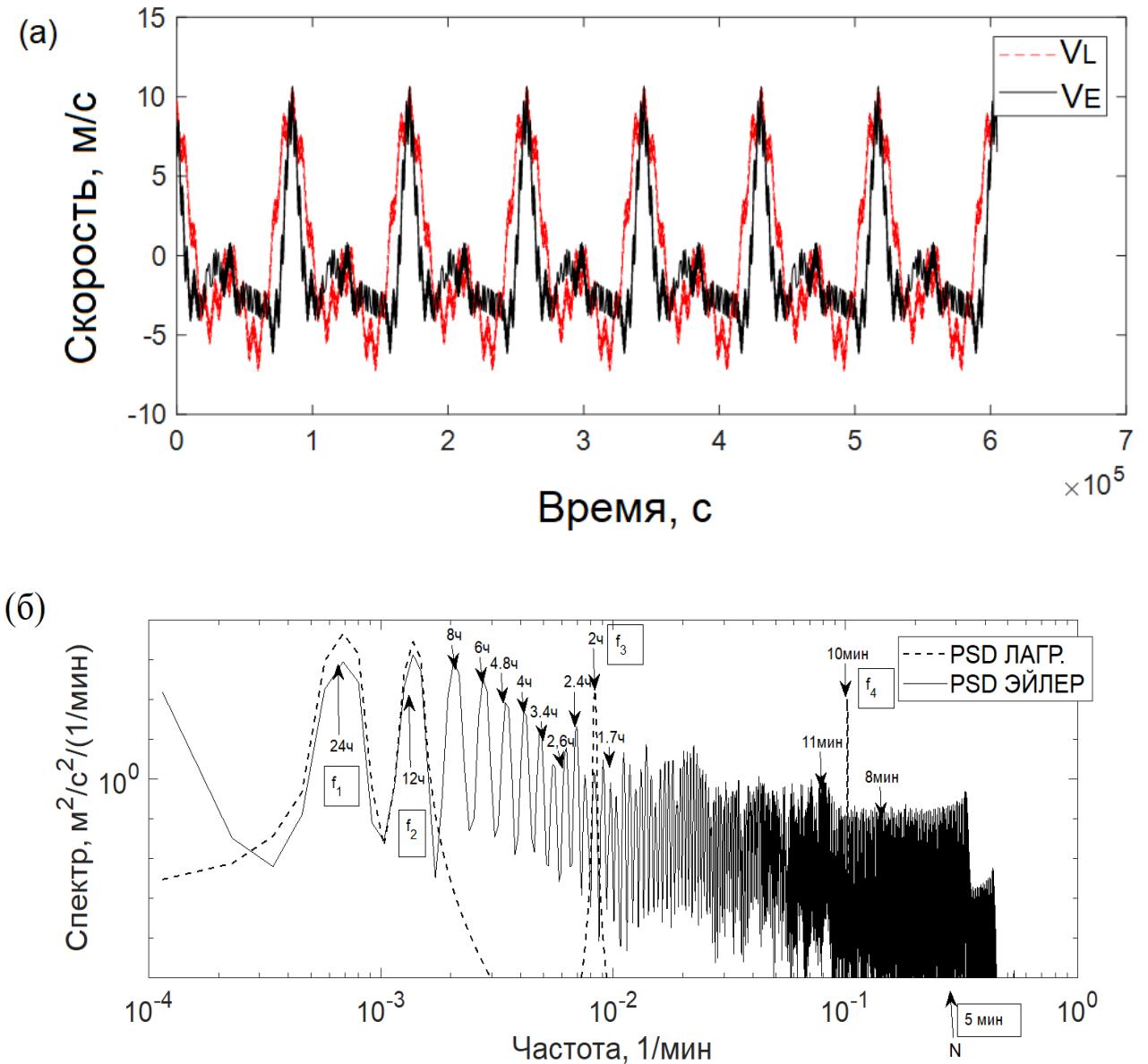


Рис.6. Временные колебания скорости частиц среды с начальной координатой $a = 0, b = 0, c = z_1$ (красная линия) и эйлеровой скоростью среды в т. $x = 0, y = 0, z = z_1$ (чёрная линия) (а), и соответствующие спектры этих колебания (б).

Таким образом, индуцируемая волнами и приливами адвекция является ключевым механизмом, формирующим наблюдаемые спектры флюктуаций 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:

- 1) Разработана модель генерации спиралевидных внутренних волн субмезомасштабными вихрями, которая объясняет наблюдаемые формы и периоды полосатых спиралевидных структур на РСА снимках, соответственно, формами волновых гребней внутренних волн в слое термоклина и их длинами волн, полученными из этой модели.
- 2) Показано, что внутренние волны в океане вызывают флуктуации атмосферного давления, температуры и скорости ветра в приводном слое атмосферы благодаря резонансному взаимодействию волн со спектральными компонентами этих флуктуаций. Такое взаимодействие возможно в случае, если частоты и горизонтальные скорости распространения определенных спектральных компонент атмосферных флуктуаций давления близки к таковым для внутренних волн в слое термоклина. Оценки вклада внутренних волн в океане в колебания атмосферного давления (десятки и сотни Па) показывают, что он может быть сравним с вкладом в эти колебания со стороны других источников ВГВ в атмосфере.
- 3) Внутренние волны, распространяющиеся в слое термоклина, влияют в широком диапазоне периодов (10 мин, 18-20 мин, 35 мин, 1ч, 3 ч и 4.7 ч) общих для океанических и атмосферных внутренних волн, на турбулентные потоки тепла и импульса через поверхность океана. Эти периоды получены из кросс-спектров временных вариаций температуры воды на разных глубинах (10 и 20 м) и вариаций вертикальных турбулентных потоков тепла и импульса. Анализ гистограмм распределения числа спектральных максимумов по разным периодам колебаний показал, что наибольшее число этих максимумов за весь временной интервал измерений приходился на диапазон периодов 1-3 ч, общий для всех флуктуаций метеопараметров и вертикальных турбулентных потоков тепла и импульса.
- 4) Внутренние гравитационные волны в атмосфере вызывают колебания температуры и концентрации примесей (углекислого газа) в широком диапазоне периодов. Путем анализа кросс-спектров метеопараметров (температуры воздуха и скорости ветра), ТПО,

вертикальных турбулентных потоков тепла, потока импульса и концентрации CO₂ в этих спектрах были выявлены колебания с общими периодами в 27 мин, 40 мин, 50 мин, 2 ч, 3 ч, 6 ч.

- 5) Разработана модель влияния индуцируемой атмосферными ВГВ и приливами адвекции частиц воздуха на формирование наблюдаемых спектров флюктуаций метеопараметров с присущей им “гребенчатой” формой, состоящей из большого числа спектральных максимумов и минимумов. С помощью этой модели показано, что влияние нелинейных эффектов адвекции каждой внутренней гравитационной волны в поле скорости ветра, индуцируемого всеми волнами и приливами, приводит к появлению в спектре флюктуаций скорости ветра множественных гармоник с суммарными и разностными частотами заданных частот внутренних волн и приливов.
- 6) Найдена связь частотных спектров флюктуаций температуры и концентраций примесей, вызванных ВГВ, со спектром флюктуаций горизонтальной скорости ветра.

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., Осадчиеv 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. 7582–600. 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. DOI: 10.7868/S3034648725040086

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., Осадчиеv 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.