

На правах рукописи

ШОМИНА Ольга Владимировна

**ИССЛЕДОВАНИЕ
МЕХАНИЗМОВ ИЗМЕНЧИВОСТИ КОРОТКИХ ВЕТРОВЫХ ВОЛН
И ГЕОМЕТРИИ СЛИКОВЫХ СТРУКТУР
В ПРИЛОЖЕНИИ К ПРОБЛЕМЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород
2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
заведующий отделом радиофизических методов в гидрофизике ИПФ РАН
Станислав Александрович Ермаков

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Андрей Георгиевич Зацепин
(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук)

доктор физико-математических наук
Владимир Николаевич Кудрявцев
(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»)

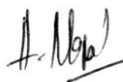
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук

Защита состоится «28» февраля 2022 г. в 15:00 час. на заседании диссертационного совета Д 002.069.01 в Институте прикладной физики РАН по адресу: 603950 Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Института прикладной физики РАН и на его официальном сайте (<http://www.ipfran.ru/>).

Автореферат разослан «25» января 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета к.ф.-м.н.



А. И. Малеханов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы

Вариации характеристик ветрового волнения на морской поверхности могут служить маркером различных явлений и процессов, происходящих в атмосфере и гидросфере [1–8]. В связи с увеличением антропогенной нагрузки, связанной с промышленными выбросами загрязняющих веществ, судовыми сбросами, бытовыми канализационными стоками и т.д. [9], дистанционная диагностика загрязнений на морской поверхности является актуальной задачей. При этом к перспективным относятся методы микроволнового радиолокационного (РЛ) зондирования как всепогодные и круглосуточные. Основная проблема радиолокационного мониторинга поверхностных загрязнений в настоящее время заключается в отсутствии надежных связей между характеристиками пленок и РЛ сигналов, при этом физические механизмы и их относительный вклад в рассеяние микроволн морской поверхностью активно обсуждаются в литературе [10–12]. Слабо изучены и физические механизмы распространения поверхностных загрязнений в океане, и процессы деградации последних, кроме того, данные о вязкоупругих характеристиках пленок разной природы (нефтепродуктов, синтетических поверхностно-активным веществ, биогенных пленок) носят фрагментарный характер [13–14]. Все описанные факторы ограничивают возможности оперативного мониторинга морской поверхности и препятствуют развитию систем экстренного реагирования на катастрофические загрязнения акваторий.

На данный момент в качестве основных параметров, характеризующих пленочные слики на РЛ изображениях морской поверхности, в литературе рассматриваются радарные контрасты (отношение интенсивности сигнала в фоновом участке морской поверхности к соответствующей величине в слике) и морфологические особенности (набор данных о форме и изрезанности границы слика). Экспериментальные РЛ наблюдения морской поверхности свидетельствуют о том, что для пленочных сликов величины контрастов зависят от поляризации излучения, условий зондирования (угла падения и зондирующей длины волны), гидрометеорологических условий (скорость и направление ветра по отношению к направлению зондирования) и вязкоупругих характеристик самой пленки [15, 16]. Одним из перспективных путей получения информации о веществе слика на морской поверхности является развитие методов восстановления вязкоупругих характеристик поверхностно-активных веществ (ПАВ) по наблюдаемым значениям радарных контрастов с привлечением вспомогательной информации о гидрометеорологических условиях в момент получения изображения [17].

Вопрос о применимости резонансного (брэгговского) механизма рассеяния РЛ излучения морской поверхностью обсуждается в литературе в последние годы, что связано с накоплением эффектов, описание которых невоз-

можно в рамках Брэгговской и двухмасштабной моделей [4]. В качестве источников нерезонансного рассеяния, дающих значительный вклад в сигнал на горизонтальной поляризации зондирующего излучения, выделяют сильные обрушения интенсивных ветровых волн [18] и генерируемые ими водяные брызги и пузырьки [19], а также нелинейные особенности профилей микрообрушений [20]. В условиях умеренных углов падения излучения выделение Брэгговской компоненты рассеяния, пропорциональной интенсивности спектра ветровых волн на брэгговском волновом числе, возможно при одновременном зондировании морской поверхности на вертикальной (ВВ) и горизонтальной (ГГ) поляризациях. В таком случае радарный контраст брэгговской компоненты пропорционален спектральному контрасту – отношению интенсивности ветрового волнения на брэгговском волновом числе в фоне к интенсивности в пленке. Верификация моделей спектральных контрастов [11, 21] возможна при анализе данных систематических наблюдений РЛ контрастов в пленочных слайках с известными характеристиками (модельных искусственных слайках) при различных условиях зондирования, на данный момент не представленных в литературе. Существующие модели, описывающие формирование спектра поверхностного волнения и влияние ПАВ на его характеристики, также нуждаются в развитии, в частности, в части корректного учета слагаемых, описывающих сток энергии ветровых волн. Так, современные модели не учитывают затухание волнения, связанное с влиянием приповерхностной турбулентности, при этом наблюдения областей локализованной турбулентности (например, выглаженных корабельных следов) свидетельствуют о существенном ее влиянии на затухание поверхностных волн [22]. Оценки характеристик океанической турбулентности [23] показывают, что для задач радиолокации длина поверхностной брэгговской волны по порядку величины может быть сравнима с интегральным масштабом турбулентности. Для таких случаев вклад различных механизмов в затухание поверхностной волны нельзя считать определенным, а существующие экспериментальные работы (например, [24, 25]) ограничены в основном исследованиями затухания волн на мелкомасштабной турбулентности. Таким образом, можно сделать вывод о необходимости проведения новых экспериментов, основанных на корректных экспериментальных методиках и затрагивающих случаи сопоставимых по порядку пространственных масштабов турбулентности и волны. Учет членов, ответственных за затухание волнения на турбулентности, является одним из возможных способов развития модели спектральных контрастов для волн см диапазона, который мог бы объяснить некоторые наблюдаемые особенности поведения контрастов при изменении скорости ветра, которые описаны в рамках настоящей работы.

Рассматривая морфологические особенности слайков на морской поверхности, стоит отметить, что широкая распространенность слайков биогенной природы позволяет использовать их в качестве маркеров приповерхностных процессов – неоднородных течений [26], внутренних волн [27], суб- и мезо-

масштабных вихревых структур [2, 3]. В последнем случае внешний масштаб вытянутых и закрученных полос ПАВ часто напрямую ассоциируется с масштабом маркируемого морского вихря [28, 29]. Однако такой подход не учитывает связи между размером формируемой спиральной структуры и положением источника ПАВ относительно центра вихря, а также влияние ветра на кинематику элемента слика, что может приводить к некорректной оценке истинных масштабов наблюдаемых вихревых структур. Исследование влияния этих факторов на возможности формирования и геометрические особенности спиральных сликов является одной из актуальных задач, имеющих практическое применение.

Настоящая диссертационная работа представляет собой комплексное исследование, затрагивающее ряд проблем, связанных с радиолокационным зондированием и идентификацией пленочных сликов на морской поверхности, исследованием затухания гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) на приповерхностной океанической турбулентности, анализом геометрии сликовых спиралей, маркирующих океанические вихревые структуры. Исследование выполнялось в ходе натурных и лабораторных экспериментов с использованием современного оборудования, а также теоретического анализа и численного моделирования.

Цель и задачи исследования

Основными целями настоящего исследования являются выявление новых особенностей отображения пленок в характеристиках радиолокационных сигналов, анализ механизмов изменчивости спектральных характеристик ветрового волнения в присутствии пленок ПАВ и приповерхностной турбулентности, а также исследование особенностей геометрии сликовых структур в поле неоднородных течений и ветра.

Достижение этих целей потребовало решения следующих задач:

а) проведение натурных экспериментов по РЛ наблюдению модельных сликов ПАВ при умеренных углах зондирования и анализ полученных контрастов Брэгговской и неполяризованной компонент при различных гидрометеорологических условиях;

б) исследование затухания поверхностных волн на турбулентности, сравнение его с затуханием на пленках ПАВ в условиях интенсивного ветрового волнения в приложении к проблеме формирования спектра ветровых волн и дистанционного зондирования сликов;

в) теоретическое исследование особенностей геометрии линий тока и численное моделирование распространения пассивной примеси от точечного источника в поле однородного ветрового дрейфа и неоднородного течения - одиночного морского вихря.

Научная новизна

Исследования, описанные в настоящей диссертационной работе, новы и оригинальны. По итогам их выполнения были получены следующие научные результаты:

1. На основе проведенных систематических экспериментов по радиолокационному зондированию сликов, связанных с высокоупругими пленками поверхностно-активных веществ, показано, что в условиях умеренных скоростей ветра контрасты брэгговской компоненты рассеяния в S-/C-/X-диапазонах микроволн при умеренных углах падения излучения растут с уменьшением длины микроволн при зондировании параллельно скорости ветра и уменьшаются в перпендикулярном направлении. Контраст неполяризованной компоненты увеличивается с ростом волнового числа для всех направлений зондирования, оставаясь сравнимым по порядку величины с контрастом брэгговской компоненты.

2. Развита лабораторный метод исследования затухания гравитационно-капиллярных волн на поверхности турбулизованной жидкости, основанный на одновременной генерации поверхностных волн и турбулентности в вертикально осциллирующей кювете. Метод оптимизирован в части выбора режимов параметрического возбуждения волн, что позволило существенно повысить точность определения коэффициента затухания последних. Показано, что развитый метод может характеризоваться как наиболее достоверный и точный по сравнению с известными из литературы.

3. С использованием параметрического метода в условиях контролируемого лабораторного эксперимента исследовано затухание поверхностных волн на турбулентности. Получены зависимости коэффициентов затухания гравитационно-капиллярных волн и вихревой вязкости от частоты волны и для сопоставимых масштабов турбулентности и длины волны впервые выявлено существование максимума вихревой вязкости как функции длины волны, показано, что величина вихревой вязкости пропорциональна среднеквадратичной скорости турбулентных пульсаций.

4. На основе теоретического анализа особенностей линий тока приповерхностного течения, связанного с осесимметричным спиральным вихрем и постоянным ветровым дрейфом, показано, что присутствие поверхностного дрейфа, меньшего максимума скорости в вихре, приводит к образованию двух критических точек линий тока. Первая, являющаяся узлом или фокусом и расположенная внутри ядра вихря, является устойчивой, если дивергенция двумерного поля скорости в этой критической точке отрицательна, и неустойчивой, если положительна. Вторая особая точка, локализованная вне ядра вихря, является седлом. Такое поведение линий тока качественно согласуется с особенностями геометрии сликовых структур, наблюдаемых на спутниковых изображениях морской поверхности.

5. Аналитически и численно показано, что в присутствии однородного поверхностного ветрового дрейфа центры морского вихря и спирального слика, формируемого от точечного источника, могут быть разнесены на расстояние, сравнимое с радиусом ядра вихря; для заданных характеристик вихря продемонстрировано существование максимальной величины скорости дрейфа, при которой возможно формирование спиральной структуры, при этом ее геометрия сильно зависит от положения источника ПАВ относительно центра вихря и скорости поверхностного дрейфового течения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Контрасты брэгговской компоненты радиолокационного сигнала при зондировании пленочных сликов на умеренных углах падения излучения в условиях умеренных ветров растут с увеличением волнового числа микроволн S-/C-/X-диапазонов при наблюдении параллельно ветру и уменьшаются в направлении поперек ветра.

2. Развитый параметрический метод исследования затухания волн на турбулентности позволяет минимизировать факторы, маскирующие эффект затухания, и получить более точные значения коэффициента затухания волн по сравнению с описанными ранее в литературе.

3. В диапазоне сопоставимых масштабов турбулентности и длин волн существует максимум вихревой вязкости как функции длины волны, а сама величина пропорциональна среднеквадратичной скорости турбулентных пульсаций.

4. Для осесимметричного вихря, модуль скорости течения в котором растет внутри ядра и спадает при удалении от него, в присутствии однородного дрейфового течения со скоростью, меньшей максимальной скорости течения вихря, картина линий тока, маркирующих распространение пассивной примеси от точечного источника поверхностно-активных веществ на морской поверхности, выявляет наличие двух критических точек.

5. В присутствии однородного ветрового дрейфа истинный центр морского вихря и центр сликовой спирали, формируемой от точечного источника, могут не совпадать, а расстояние между ними может достигать порядка радиуса ядра вихря. При заданных характеристиках вихря масштаб проявляемой спиральной структуры зависит от положения источника поверхностно-активных веществ относительно центра вихря, величины и направления однородного дрейфового поверхностного течения и может варьироваться в широких пределах.

Научная и практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы углубляют понимание механизмов изменчивости ветрового волнения в присутствии пленок ПАВ, в частности, в условиях интенсивного ветрового волнения; развивают возможности иденти-

фикации пленок на морской поверхности за счет учета затухания, связанного с влиянием на волны приповерхностной турбулентности; характеризуют особенности геометрии спиральной сликовой структуры на фоне ветра и неоднородного течения, связанного с морским вихрем.

Полученные в ходе натуральных экспериментов контрасты Брэгговской и неполяризованной компонент РЛ рассеяния одновременно в X-, C-, S- диапазонах могут быть использованы для дальнейшего развития и верификации предложенных моделей спектральных контрастов.

Экспериментально полученные при помощи метода параметрически возбуждаемых волн коэффициенты затухания и вихревой вязкости могут использоваться при развитии механизмов гашения поверхностных волн турбулентностью.

Исследование характерных особенностей линий тока поля течений в спиральных вихрях с наложенным однородным ветровым дрейфом может выступать основой для дальнейшего развития методов корректной интерпретации спутниковых изображений спиральных сликов в части определения истинных характеристик морских вихрей.

Результаты работы использовались при выполнении проектов РФФИ (17-05-00448, 15-35-20992, 14-05-00876, 13-05-97043, 13-05-90429, 12-05-31237), РНФ (18-77-10066, <https://rscf.ru/project/18-77-10066/>; 18-17-00224), Госзадания 0729-2020-0037 и 0030-2021-0006, работ по СЧ НИР договор № 075-15-2020-776-ИПФ от 17.10.2020 г., работ по Соглашению с Минобрнауки России от 26.08.2014 № 14.607.21.0055, исследований в рамках стипендии Президента Российской Федерации.

Апробация результатов работы и публикации

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах ИПФ РАН, Конференции по радиофизике (2011), Международной конференции "Frontiers of nonlinear physics" (2013), Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" (2016, 2018, 2019), Конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики» (2012), Генеральной ассамблее Европейского геофизического союза (EGU General Assembly, 2013, 2021), международном океанографическом симпозиуме SeaSAR (2018), международной конференции SPIE Remote Sensing (2016, 2019, 2020) и международной конференции IGARS (2020).

Основные научные результаты, изложенные в диссертации, с достаточной степенью полноты опубликованы в 21 печатной работе, из них 11 в реферируемых журналах текущего списка ВАК (Известия РАН. Физика атмосферы и океана 2014; Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса 2015, 2019; Proceedings of SPIE, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2016, 2017, 2019 (2), 2020; Remote Sensing 2018, Experiments in fluids 2020; IGARSS 2020 - 2020 IEEE Internation-

al Geoscience and Remote Sensing Symposium), 3 статьи в сборниках трудов конференций, 7 тезисов докладов.

Личный вклад автора. Все результаты диссертации получены при непосредственном участии автора, в том числе, в части проведения натуральных экспериментов по исследованию РЛ контрастов в слайках модельных ПАВ, обработки, анализа и интерпретации данных; проведения лабораторных экспериментов по исследованию затухания ГКВ из-за турбулентности, обработки и интерпретации данных; сравнительного анализа механизмов затухания ГКВ и развития модели спектральных контрастов с учетом затухания волн на турбулентности; автору принадлежит ведущая роль в исследовании особенностей линий тока в полях спиральных вихрей и ветрового дрейфа и применении полученных при этом результатов для описания геометрических особенностей спиральных сликовых структур на морской поверхности.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитированной литературы и списка опубликованных работ по теме диссертации. Общий объем диссертации – 113 страниц, включая 46 рисунков, 2 таблицы, список цитированной литературы, состоящий из 211 работ, и список работ по теме диссертации.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, обозначена новизна результатов диссертации и приведены положения, выносимые на защиту, обозначены научная и практическая значимость работы, описано краткое содержание работы.

Первая глава посвящена описанию результатов натуральных экспериментов по наблюдению модельных сликов ПАВ в условиях умеренных ветров (4–12 м/с) с использованием спутниковых данных и средств многочастотной радиолокации на умеренных углах падения излучения, в частности, приводится анализ поведения контрастов Брэгговской и неполяризованной компонент рассеяния.

В разделе 1.1 описан современный подход к интерпретации характеристик рассеянного на морской поверхности РЛ сигнала при умеренных углах падения излучения; обоснована необходимость использования поляризационных средств радиолокации для выделения брэгговской и неполяризованной компонент рассеяния, формируемых различными структурами на морской поверхности.

В разделе 1.2 описана методика проведения систематических натуральных экспериментов по наблюдению искусственных пленочных сликов с известными характеристиками средствами спутниковой (X-диапазон) и многочастотной поляризационной радиолокации (S-C-X-диапазоны).

В разделе 1.3 представлены результаты РЛ зондирования модельных сливок в различных направлениях к ветру, в частности, анализ поведения контрастов Брэгговской и неполяризованной компонент. Показано, что контраст неполяризованной компоненты в слике по порядку величины сравним с величиной брэгговского контраста и подвержен росту с увеличением волнового числа. Значительное (в несколько раз) уменьшение интенсивности неполяризованной компоненты при умеренных скоростях ветра свидетельствует о существенном влиянии пленки на характеристики микрообрушений.

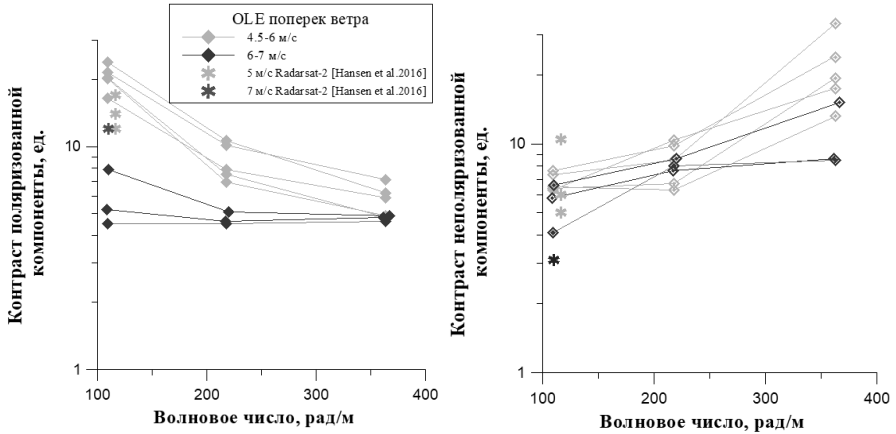


Рис. 1. Контрасты Брэгговской (слева) и неполяризованной (справа) компонент при зондировании поперек ветра в сликах OLE при различных скоростях ветра

Показано, что контрасты Брэгговской, и неполяризованной компонент в сликах в целом демонстрируют уменьшение с ростом скорости ветра. В условиях умеренных ветров контрасты Брэгговской компоненты монотонно растут с волновым числом при синхронном наблюдении пленок ПАВ в S-C-X-диапазонах в направлении параллельно ветру и спадают при наблюдении поперек ветра. Интерпретация полученных результатов для волн сантиметрового диапазона проведена на основе модели локального баланса энергии ветровых волн [21]. Показано, что для наблюдений поперек ветра расчеты адекватно описывают поведение контрастов Брэгговской компоненты в условиях умеренных ветров, однако не объясняют их уменьшения с ростом скорости ветра (при ветрах $>6-7$ м/с, см. рис. 1). Для объяснения наблюдаемого эффекта предложено развитие модели локального баланса с учетом нового члена затухания, связанного с интенсификацией турбулентности верхнего слоя при увеличении скорости ветра.

Во **второй главе** приведено исследование затухания поверхностных волн в присутствии приповерхностной турбулентности в приложении к проблеме формирования спектра ветрового волнения, в том числе, в присутствии пленок ПАВ.

В разделе 2.1 приведен обзор литературных источников, описывающих затухание волнения на поверхности турбулизованной жидкости. Как показал анализ литературы, теоретические работы посвящены в основном описанию затуханию волн на крупных вихрях или мелкомасштабной (по сравнению с длиной волны) турбулентности. Для случая сопоставимых пространственных масштабов волны и турбулентности, важного для задач РЛ наблюдения морской поверхности в X-S-диапазонах, вклад описанных механизмов нельзя считать определенным. Экспериментальные исследования затухания волн на турбулентности демонстрируют значительный разброс данных (например, [24]), который может быть связан с несовершенством экспериментальных методик. Такие факторы, как влияние эффектов нелинейной передачи энергии между гармониками интенсивных волн, пространственной неоднородности характеристик турбулентности, а также средних приповерхностных течений на динамику поверхностной волны, могут маскировать эффект гашения волн турбулентностью и ухудшать точность получаемых коэффициентов затухания. Этим обосновывается необходимость проведения новых экспериментов, основанных на корректных методиках, исключая влияние описанных негативных факторов.

Раздел 2.2 посвящен результатам лабораторного исследования затухания поверхностных волн из-за турбулентности при помощи метода параметрически возбуждаемых волн. В разделе приведено описание метода, адаптированного для одновременного возбуждения в кювете волн и турбулентности. Турбулентность генерировалась благодаря низкочастотным интенсивным вертикальным осцилляциям при обтекании водой перфорированной пластины, закрепленной близко ко дну; волны на водной поверхности возбуждались высокочастотными колебаниями с амплитудой, существенно меньшей амплитуды низкочастотных осцилляций. Коэффициент затухания волны в присутствии турбулентности восстанавливался по измеренному пороговому ускорению кюветы, при котором начиналась параметрическая генерация волн. Измерения проводились при двух интенсивностях турбулентности, частоты генерации турбулентности выбирались из условия отсутствия возбуждения на этой частоте моды ГКВ. Измерение характеристик турбулентности в вертикальном разрезе лазерного ножа проводилось при помощи метода Particle imaging velocimetry, широко используемого для измерения полей скоростей в макроскопических жидких или газовых системах.

Было показано, что вклад высокочастотных колебаний в характеристики турбулентности в новых экспериментах пренебрежимо мал, что позволяет считать возбуждение турбулентности и поверхностных волн независимыми. Близость внешних масштабов перфорированной пластины к масштабам дна бассейна позволяет ограничить область взаимодействия волны и турбулентности размерами кюветы и считать турбулентность квазиоднородной. Влияние вторичных средних течений, характерных для механически осциллирующих волновых бассейнов и приводящих в случае бегущих волн к их транс-

формации, минимизировано за счет исследования стоячих волн как суммы двух противоположно направленных бегущих волн. Измерение затухания волн на пороге генерации позволяет минимизировать нелинейные эффекты передачи энергии волны гармоникам высокого порядка. Оптимизация метода в части выбора режимов параметрического возбуждения волн позволила существенно уменьшить погрешности определения коэффициента затухания и вихревой вязкости. Описанные факторы позволяют заключить, что предложенная экспериментальная методика имеет ряд преимуществ и может характеризоваться как более корректная и точная относительно описанных в литературе.

Результаты эксперимента анализировались в терминах вихревой вязкости. Показано, что описанные результаты относятся к случаю сопоставимых по порядку величины пространственных масштабов турбулентности (L) и волны (λ); указанный диапазон параметров слабо затронут в известных из литературы лабораторных исследованиях (рис. 2). Расширение частотного диапазона исследуемых поверхностных волн позволило впервые выявить существование максимума вихревой вязкости как функции частоты (или длины) волны. Показано, что в диапазоне сопоставимых длины волны и масштаба турбулентности величина вихревой вязкости пропорциональна среднеквадратичной скорости турбулентных пульсаций.

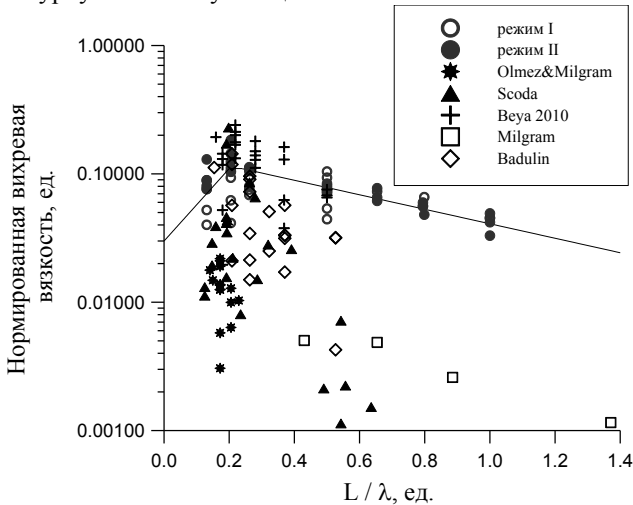


Рис. 2. Нормированная вихревая вязкость в новых экспериментах (круги) в сравнении с данными, взятыми из литературных источников (см. легенду)

Раздел 2.3 посвящен сравнительному анализу затухания поверхностных волн из-за влияния турбулентности и пленок ПАВ. В условиях лабораторного эксперимента показано, что опрокидывание гребня волны приводит не только к генерации локализованной интенсивной турбулентности, но и к локальному

разрыву пленки ПАВ. Результаты измерений коэффициента поверхностного натяжения вдоль профиля обрушающихся волн с использованием методики одновременного взятия поверхностных проб воды демонстрируют увеличение коэффициента поверхностного натяжения на гребне, что указывает на уменьшение концентрации ПАВ на поверхности воды вблизи этой точки.

Проведен сравнительный анализ механизмов затухания ГКВ, связанных с затуханием на турбулентности и на пленке, после опрокидывания пенного гребня в приложении к зондированию морской поверхности в S-, C- и X-диапазонах. Показано, что учет вариаций коэффициента затухания сразу после обрушения может приводить к слабой вариации спектрального контраста в слике, не превышающей порядка процентов, вследствие малой площади обрушений на морской поверхности [30]. Предложено развитие модели спектральных контрастов в сликах ПАВ с учетом затухания волн из-за влияния фоновой приповерхностной турбулентности; соответствующие расчеты демонстрируют адекватное описание наблюдаемых контрастов Брэгговской компоненты в направлении зондирования поперек ветра (рис. 3).

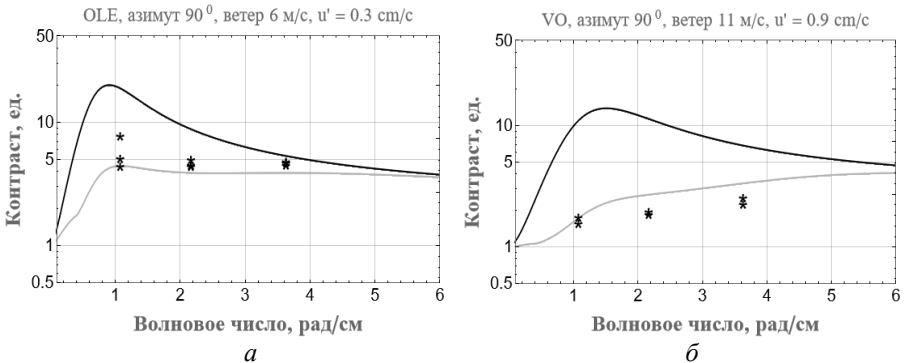


Рис. 3. Данные радарных контрастов брэгговской компоненты для сликов олеиновой кислоты (а) и растительного масла (б) и модельные расчеты: исходные (черная кривая) и с учетом затухания ГКВ на турбулентности (серая кривая). Скорости ветра во время экспериментов и характеристики турбулентности, используемые для расчетов, см. надписи на рисунках; масштаб турбулентности при расчетах 3 см

Третья глава посвящена исследованию геометрии поверхностных сликовых структур в поле ветра и неоднородных течений, а именно одиночных океанических вихрей.

Раздел 3.1 посвящен постановке проблемы, существующей в настоящее время в методах интерпретации спутниковых данных о форме спиральных сликовых структур, ассоциированных с присутствием в акватории океанических вихрей; показана прикладная значимость корректного определения характеристик вихревых структур [31]. В условиях умеренных ветров около 80% океанических вихрей проявляются на РЛ изображениях благодаря сли-

ковому механизму [32], при этом традиционный подход к интерпретации изображений спиральных сликов сводится к прямой ассоциации размеров спирали и размеров вихрей. Показано, что такой подход, пренебрегающий влиянием приповерхностного ветра на кинематику элемента слика и не учитывающий положение источника ПАВ относительно центра вихря, может приводить к некорректной интерпретации спутниковых данных в части восстановления характеристик вихрей.

В разделе 3.2 приведены результаты теоретического исследования геометрии линий тока течений в поле одиночного осесимметричного спирального вихря и однородного ветрового дрейфового течения. Система нелинейных уравнений линий тока проанализирована, показано, что присутствие поверхностного дрейфа, меньшего максимума скорости в вихре, приводит к образованию двух критических точек линий тока. Определены положения этих точек, в общем случае исследован их характер. Первая, являющаяся узлом или фокусом и расположенная внутри ядра вихря, является устойчивой, если дивергенция двумерного поля скорости в этой критической точке отрицательна, и неустойчивой, если положительна. Вторая особая точка, локализованная вне ядра вихря, является седлом. В отсутствие процессов растекания пленка ПАВ может рассматриваться как пассивный маркер, в таком случае траектории элементов слика, маркирующие линии тока, демонстрируют появление описанных особых точек в геометрии спиральных сликовых структур на морской поверхности.

Раздел 3.3 посвящен численному моделированию распространения пассивной примеси от точечного источника. Для моделирования течений в вихре применялся профиль скоростей, который описывается уравнениями модели [33], при этом использование другого профиля для моделирования качественно не влияет на геометрию линий тока. Результаты моделирования хорошо совпадают с результатами теоретического исследования в части описания положения особых точек и их типа. Поведение линий тока качественно согласуется с особенностями сликовых структур, наблюдаемых на спутниковых изображениях морской поверхности (рис. 4).

В разделе 3.4 обсуждаются полученные результаты. Показано, что в присутствии однородного ветрового дрейфа истинный центр морского вихря и центр сликовой спирали могут не совпадать, а расстояние между ними может достигать порядка радиуса ядра вихря. Применимость полученного вывода обсуждается на основе анализа литературных данных. Продемонстрировано наличие «пороговой» скорости ветра, превышение которой приводит к невозможности образования спиральной сликовой структуры при неизменных характеристиках вихря. Показано, что при заданных характеристиках вихря масштаб проявляемой спиральной структуры зависит от положения источника ПАВ относительно центра вихря, величины и направления однородного дрейфового течения и может варьироваться в широких пределах.

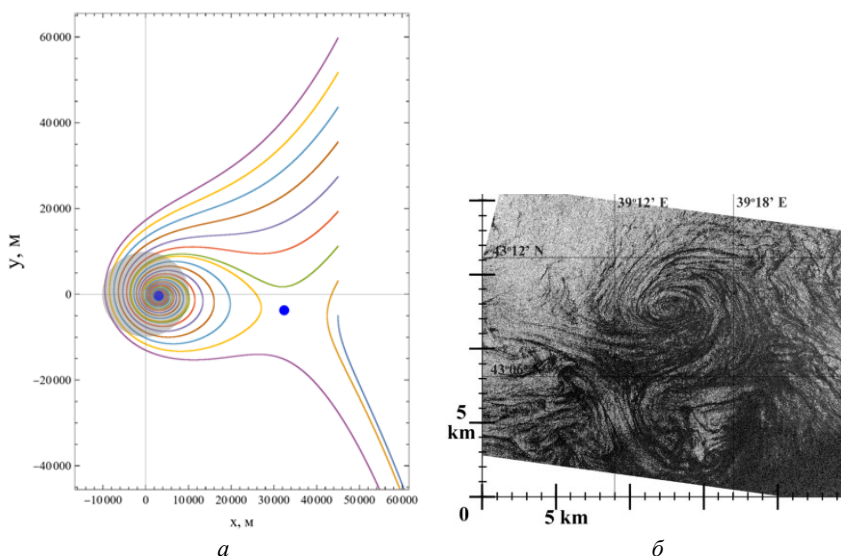


Рис. 4. Траектории пассивной примеси (а) от точечных источников (разными линиями) в поле однородного северного ветрового дрейфа (15 см/с) и циклонического вихря Бэйкера ($U_{\max} = 0.065$ м/с, $z/z_m = 4$, $R = 10000$ м) (серый круг – ядро вихря, точки – рассчитанные положения критических точек линий тока); б – сликовые структуры на морской поверхности – снимок Sentinel-1B SAR от 03:32:06 GMT 04.10.2017

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Цитируемая литература

1. *Johannessen J. A., Shuchman R. A., Digranes G., Lyzenga D. R., Wackerman C., Johannessen O. M., Vachon P. W.* Coastal ocean fronts and eddies imaged with ERS 1 synthetic aperture radar // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 1996. Vol. 101, №. С3. P. 6651-6667.
2. *Gade M., Byfield V., Ermakov S., Lavrova O., Mitnik L.* Slicks as Indicators for Marine Processes // *Oceanography*. 2013. Vol. 26, №. 2. P. 138-149.
3. *Mitnik L., Vyacheslav D., Konstantinov O., Fischenko V., Darkin D.* Remote sensing of surface films as a tool for the study of oceanic dynamic processes // *Ocean and Polar Research*. 2009. Vol. 31, №. 1. P. 111-119.
4. *Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Лаврова О.Ю., Литовченко К.Ц., Митягина М.И., Раев М.Д., Сабинин К.Д., Трохимовский Ю.Г., Чурюмов А.Н., Шуган И.В.* Физические механизмы формирования аэрокосмических радиолокационных изображений океана // *УФН*. 2003. Т. 173, № 1. С. 69-87.
5. *Пиваев П.Д., Кудрявцев В.Н., Балашова Е.А., Шапрон Б.* Особенности проявления донной топографии на спутниковых РСА-изображениях // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т.36, № 3. С. 313-328.

6. *Иванов А. Ю.* О распознавании океанических внутренних волн и атмосферных гравитационных волн на радиолокационных изображениях морской поверхности // Исследования Земли из космоса. 2011. Т. 1. С. 70–85.
7. *Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М., Строчков А.Я., Шендрик В.Д.* Спутниковый мониторинг интенсивного цветения водорослей в Рыбинском водохранилище // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 3. С. 54–72.
8. *Дулов В. А., Юровская М. В., Козлов И. Е.* Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения // Морской гидрофизический журнал. 2015. №. 6. С. 43–60.
9. *Иванов А. Ю.* Стики и пленочные образования на космических радиолокационных изображениях // Исследование Земли из космоса. 2007. №3. С. 73–96.
10. *Phillips O.M.* Radar returns from the sea surface—Bragg scattering and breaking waves // J. Phys. Oceanogr. 1988. Vol. 18. P. 1065–1074.
11. *Kudryavtsev V., Hauser D., Gaudal G., Charpon B.* A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface - 1. Background model // Journal of Geophysical Research. 2003. Vol. 108, №. C3. P. 8054.
12. *Ermakov S., da Silva J. C. B., Kapustin I., Sergievskaya I.* Remote sensing of oil films on the water surface using radar // Proc. SPIE 8532, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2012. 2012. P. 85320M.
13. *Sergievskaya I., Ermakov S., Lazareva T., Guo J.* Damping of surface waves due to crude oil/oil emulsion films on water // Marine Pollution Bulletin. 2019. Vol. 146. P. 206–214.
14. *Lombardini P. P., Fiscella B., Trivero P., Cappa C., Garrett W. D.* Modulation of the Spectra of Short Gravity Waves by Sea Surface Films: Slick Detection and Characterization with a Microwave Probe // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 1989. Vol.6, № 6. P. 882–890.
15. *Hansen M.W., Kudryavtsev V., Chapron B., Brekke C., Johannessen J.A.* Wave Breaking in Slicks: Impact on C-Band Quad-Polarized SAR Measurements // IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 2016. Vol. 9. P. 4929–4940.
16. *Gade M., Alpers W., Ermakov S.A., Huehnerfuss H., Lange P.* Wind-wave tank measurements of bound and freely propagating short gravity-capillary waves. // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103. P. 21697–21709.
17. *Alpers W., Holt B., Zeng K.* Oil spill detection by imaging radars: Challenges and pitfalls // Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 201. P. 133–147.
18. *Liu Y., Frasier S. J., McIntosh R. E.* Measurement and classification of low-grazing-angle radar sea spikes // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1998. Vol. 46, № 1. P. 27–40.
19. *Donelan M.A., Pierson W.J.* On the Dependence of the Equilibrium Range of Sea Wave Spectra with Wave Age // Boundary-Layer Meteorology. 1998. Vol. 86. P. 29–45.
20. *Sergievskaya I. A., Ermakov S.A., Ermoshkin A.V., Kapustin I.A., Shomina O.V., Kupaev A.V.* The Role of Micro Breaking of Small-Scale Wind Waves in Radar Backscattering from Sea Surface // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, № 24. P. 4159.
21. *Ермаков С. А., Пелиновский Е. Н., Талитова Т. Г.* О влиянии пленок поверхностно-активных веществ на изменения спектров ветрового волнения под

действием внутренних волн // Известия АН СССР. ФАО. 1980. Т. 16, № 10. С. 1068-1076.

22. *Ermakov S., Kapustin I., Lazareva T.* Ship wake signatures in radar/optical images of the sea surface: observations and physical mechanisms // Proc. SPIE 9240, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2014. 2014. 92400N.

23. *Drazen D. A., Melville W. K.* Turbulence and mixing in unsteady breaking surface waves // Journal of Fluid Mechanics. 2009. Vol. 628. P. 85-119.

24. *Бадулин С.И., Воронаев С.И., Куликов А.В., Розенберг А.Д.* О воздействии турбулентности на регулярные гравитационные волны малой амплитуды // Океанология. 1988. № XXXIII (4). С. 551-560.

25. *Beya J., Peirson W., Banner M.* Attenuation of gravity waves by turbulence // Coastal Engineering Proceedings. 2011. № 32.

26. *Lavrova O., Serebryany A., Bocharova T.* Investigation of small scale hydrodynamic processes using high resolution SAR imagery and ADCP data // European Space Agency Living Planet Symp. 722. Edinburgh, UK (9–13 September) 2013. P. 9–13.

27. *da Silva J.C.B., Ermakov S.A., Robinson I.S., Jeans D.R.G., Kijashko S.V.* Role of surface films in ERS SAR signatures of internal waves on the shelf: 1. Short-period internal waves // Journal of Geophysical Research. 1998. Vol.103, №C4. P. 8009-8031.

28. *Ivanov A. Y., Ginzburg A. I.* Oceanic eddies in synthetic aperture radar images // Journal of Earth System Science. 2002. Vol. 111, № 3. С. 281-295.

29. *Мутягина М. И., Лаврова О. Ю.* Вихревые структуры и волновые процессы в прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря, выявленные в ходе спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 2, №. 5. С. 155-164.

30. *Callaghan A., de Leeuw G., Cohen L., O'Dowd C. D.* Relationship of oceanic whitecap coverage to wind speed and wind history // Geophysical Research Letters. 2008. V.35, №23. P. L23609.

31. *Kubryakov A.A., Stanichny S.V., Zatsepin A.G., Kremenetskiy V.V.* Long-term variations of the Black Sea dynamics and their impact on the marine ecosystem // Journal of Marine Systems. 2016. Vol. 163. P. 80-94.

32. *Karimova S.* Spiral eddies in the Baltic, Black and Caspian seas as seen by satellite radar data // Advances in Space Research. 2012. Vol. 50, №. 8. P. 1107-1124.

33. *Baker C. J., Sterling M.* Modelling wind fields and debris flight in tornadoes // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2017. Vol. 168. P. 312-321.

Список работ по теме диссертации

1*. *Shomina O., Kapustin I., Ermakov S.* Damping of gravity–capillary waves on the surface of turbulent fluid // Experiments in Fluids. 2020. Vol. 61, №. 8. P. 1-12. <https://doi.org/10.1007/s00348-020-03022-5>

2*. *Ermakov S., Sergievskaya I., da Silva J., Kapustin I., Shomina O., Kupaev A., Molkov A.* Remote Sensing of Organic Films on the Water Surface Using Dual Co-Polarized Ship-Based X-/C-/S-Band Radar and TerraSAR-X // Remote Sensing. 2018. Vol. 10, № 7. P.1097. <https://doi.org/10.3390/rs10071097>

3*. *Шомина О.В., Капустин И.А., Ермошкин А.В., Ермаков С.А.* О динамике искусственной сликовой полосы в прибрежной зоне Чёрного моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. №. 16 (4). С. 222-232. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-222-232

4*. *Ермаков С. А., Капустин И. А., Шомина О. В.* Лабораторное исследование затухания гравитационно-капиллярных волн на поверхности турбулизованной жидкости // Известия РАН. ФАО. 2014. Т. 50, № 2. С. 232–241. DOI: 10.1134/S0001433814020042

5*. *Ермаков С. А., Капустин И. А., Лазарева Т. Н., Шомина О. В.* Экспериментальное исследование разрушения поверхностных пленок обрушивающимися гравитационными волнами. Предварительные результаты // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 1. С. 72-79.

6*. *Shomina O. V., Tarasova T. V., Danilicheva O. A., Kapustin I. A.* Manifestation of sub mesoscale marine eddies in the structure of surface slick bands // Proc. SPIE 11529, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2020. 2020. P. 115290H. <https://doi.org/10.1117/12.2572703>

7*. *Shomina O. V., Ermoshkin A.V., Danilicheva O.A., Tarasova T.V., Kapustin I.A., Ermakov S.A.* Slick bands kinematics due to marine current and wind: study and simulation // Proc. SPIE 11150, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019. 2019. P. 111501J.

8*. *Shomina O. V., Kapustin I. A., Ermakov S. A.* Damping of surface waves due to turbulence in application to the problem of ocean remote sensing // Proc. SPIE 11150, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019. 2019. P. 111501M. <https://doi.org/10.1117/12.2533223>

9*. *Ermakov S., Danilicheva O., Kapustin I., Shomina O., Sergievskazya I., Kupaev A., Molkov A.* Film slicks on the sea surface: their dynamics and remote sensing // IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2020. P. 3545-3548. doi: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323948.

10*. *Ermakov S., da Silva J., Kapustin I., Sergievskaya I., Shomina O.* Radar probing of surfactant films on the water surface using dual co-polarized SAR // Proc. SPIE 9999, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2016. 2016. P. 99990A. doi: 10.1117/12.2241444

11*. *Ermakov S. A., Kapustin I.A., Lavrova O.Yu., Molkov A. A., Sergievskaya I. A., Shomina O. V.* Experimental study of dual polarized radar return from the sea surface // Proc. SPIE 10422, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2017. 2017. P. 104220G. doi: 10.1117/12.2278555.

12*. *Шомина О.В., Ермаков С.А., Капустин И.А., Лазарева Т.Н.* Экспериментальное исследование гашения гравитационно-капиллярных волн турбулентностью // Труды XV научной конференции по радиофизике. Нижний Новгород : Издательство ННГУ. 2011. С. 229-231.

13*. *Shomina O.V., Ermakov S.A., Kapustin I.A., Lazareva T.N.* Damping of surface waves by turbulence // Proceedings of V international conference "Frontiers of nonlinear physics". 2013. P. 197-198.

14*. *Ермаков С. А., Капустин И.А., Лазарева Т.Н., Шомина О.В.* Лабораторное исследование разрушения пленок поверхностно-активных веществ обрушениями

гравитационных волн // Труды конгресса международного научно-промышленного форума «Великие реки 2015». 2015. С. 335-337.

15*. *Шомина О. В., Ермаков С. А., Капустин И. А., Лазарева Т. Н.* Экспериментальное исследование затухания волн на воде под действием турбулентности // Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики, тезисы докладов конференции молодых ученых. Нижний Новгород : ИПФ РАН. 2012. С. 153-154.

16*. *Shomina O., Ermakov S., Kapustin I., Lazareva T.* On the damping of surface waves due to turbulence // Geophysical Research Abstracts. 2013. V. 15. P. EGU2013-10557.

17*. *Ермаков С. А., Бондур В. Г., Капустин И. А., Кунаев А. В., Лецев Г. В., Мольков А. А., Шомина О. В.* Аппаратно-программный комплекс многочастотной радиолокации для мониторинга океана и внутренних водоемов: результаты натурных испытаний // Тезисы докладов 15-й Всерос. открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2016. С. 238.

18*. *Ermakov S., Sergievskaya I., da Silva J., Kapustin I., Molkov A., Shomina O.* Remote sensing of film slicks with co-polarized X-C-S-band scatterometer and TerraSAR-X // SeaSAR2018 Advances in SAR oceanography. 2018

19*. *Шомина О. В., Капустин И. А., Ермаков С. А.* Исследование затухания волн на поверхности турбулизованной жидкости: новые эффекты // Тезисы докладов 16-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2018. С. 338.

20*. *Шомина О. В., Капустин И. А., Ермошкин А. В., Даниличева О. А., Тарасова Т. В.* Кинематика сликовой полосы в поле морского течения и ветра: натуральный эксперимент и моделирование // Тезисы докладов 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2019. С. 350

21*. *Shomina O., Tarasova T., Danilicheva O., Kapustin I.* Peculiarities of marine eddy manifestation in the structure of surfactant slick band // Geophysical Research Abstracts 2021. P. EGU21-7699

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

| | |
|---|----|
| Введение..... | 4 |
| Глава 1. Натурные исследования радиолокационных контрастов в сликах поверхностно-активных веществ..... | 19 |
| 1.1 Введение..... | 19 |
| 1.2 Натурные эксперименты по наблюдению пленочных сликов с использованием средств многочастотной двухполяризационной радиолокации..... | 24 |
| 1.2.1 Результаты спутниковых наблюдений модельных пленок в X-диапазоне..... | 25 |
| 1.2.2 Результаты натурных экспериментов с использованием комплекса многочастотной радиолокации (КМРЛ) по наблюдению модельных пленок с подвижного основания..... | 28 |
| 1.2.3 Результаты натурных экспериментов с использованием КМРЛ по наблюдению модельных пленок со свайного основания..... | 31 |
| 1.3 Контрасты Брэгговской и неполяризованной компонент при радиолокационном зондировании сликов в различных направлениях к ветру: результаты и анализ в рамках модели локального баланса..... | 32 |
| 1.4. Выводы к главе 1..... | 43 |

| | |
|--|-----|
| Глава 2. Исследование механизмов затухания гравитационно-капиллярных волн в приложении к проблемам формирования спектра ветрового волнения и дистанционного зондирования пленок ПАВ на морской поверхности | 45 |
| 2.1 Введение | 45 |
| 2.2 Лабораторное исследование затухания поверхностных волн из-за турбулентности при помощи метода параметрически возбуждаемых волн | 49 |
| 2.2.1 Возбуждение гравитационно-капиллярных волн | 51 |
| 2.2.2 Генерация турбулентности и измерение ее характеристик | 53 |
| 2.2.3 Преимущества метода | 55 |
| 2.2.4 Результаты эксперимента и обсуждение | 58 |
| 2.3. Сравнительный анализ затухания поверхностных волн из-за влияния турбулентности и пленок ПАВ в приложении к задачам дистанционного зондирования сликов | 64 |
| 2.3.1. Влияние обрушающихся длинных волн на затухание гравитационно-капиллярных волн в присутствии пленки ПАВ | 65 |
| 2.3.2. Сравнение коэффициентов затухания ГКВ из-за влияния пленки ПАВ и приповерхностной турбулентности | 69 |
| 2.3.3. Развитие модели спектральных контрастов в сликах ПАВ с учетом затухания волн из-за влияния приповерхностной турбулентности | 75 |
| 2.4 Выводы к главе 2 | 77 |
| Глава 3. Исследование особенностей геометрии поверхностных сликовых структур в поле неоднородных течений и ветра | 79 |
| 3.1. Введение | 79 |
| 3.2. Теоретическое исследование геометрии линий тока в поле одиночного осесимметричного спирального вихря и однородного ветрового дрейфового течения | 83 |
| 3.3. Численное моделирование распространения поверхностно-активного вещества от точечного источника | 87 |
| 3.4. Обсуждение результатов | 93 |
| 3.5. Выводы к главе 3 | 98 |
| Заключение | 99 |
| Список цитированной литературы | 101 |
| Список работ по теме диссертации | 112 |

ШОМИНА Ольга Владимировна

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ИЗМЕНЧИВОСТИ
КОРОТКИХ ВЕТРОВЫХ ВОЛН И ГЕОМЕТРИИ СЛИКОВЫХ СТРУКТУР
В ПРИЛОЖЕНИИ К ПРОБЛЕМЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 1.12.2021.

Формат 60 × 90 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 1, 25. Тираж 100 экз. Заказ № 58(2021).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46