

На правах рукописи

ЕРМОШКИН Алексей Валерьевич

**ДИАГНОСТИКА
ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОКЕАНЕ
НА ОСНОВЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ПОД СКОЛЬЗЯЩИМИ УГЛАМИ**

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2017

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

Научный руководитель:

Баханов Виктор Владимирович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН).

Официальные оппоненты:

Зимин Алексей Вадимович, доктор географических наук, заведующий лабораторией геофизических пограничных слоёв Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (Санкт-Петербургский филиал), Санкт-Петербург.

Кузьмин Алексей Владимирович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией микроволновой радиометрии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт космических исследований Российской академии наук, Москва.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук, Москва.

Защита состоится «30» октября 2017 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.01 в Институте прикладной физики РАН по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

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

А. И. Малеханов

Общая характеристика диссертации

Актуальность темы диссертации. Данные дистанционного зондирования (ДЗ) океана являются основным источником информации о процессах, протекающих в приводном слое атмосферы, на морской поверхности и в водной толще. Наиболее распространенными являются данные спутникового зондирования, большинство из которых находятся в открытом доступе в интересах океанологов, климатологов и ученых, занимающихся проблемами дистанционного зондирования океана из космоса. Существующие радиолокационные (РЛ) средства ДЗ океана позволяют решать разнообразные океанологические задачи, среди которых можно выделить определение скорости приводного ветра, параметров ветровых волн и волн зыби, диагностику параметров внутренних волн, идентификацию загрязнений на морской поверхности. РЛ зондирование обладает рядом преимуществ, которые позволяют проводить измерения в сложных метеорологических условиях и в темное время суток. Высокое разрешение современных радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) может составить конкуренцию даже оптическим сенсорам.

Возможности РЛ зондирования опираются на достижения экспериментальных и теоретических исследований физических особенностей рассеяния радиоволн на взволнованной водной поверхности. В работах [1, 2] приведен обзор большого количества теоретических моделей рассеяния радиоволн на случайной шероховатой поверхности, приведены таблицы с оценкой эффективности моделей по ряду параметров.

Основной общепринятой теоретической моделью РЛ рассеяния на взволнованной водной поверхности является двухмасштабная модель и её модификации. В работе [3] рассмотрены два основных подхода к теоретическому решению задачи о рассеянии волны на статистически неровной поверхности – метод возмущений и метод Кирхгофа. Эти методы относятся к двум предельным случаям очень мелких и пологих неровностей (метод возмущений) или гладких и крупномасштабных (метод Кирхгофа) и не охватывают всех особенностей взволнованной морской поверхности. В этой же работе рассмотрена двухмасштабная модель, которая является комбинацией описанных выше предельных случаев. В данной модели предполагается, что рассеяние на взволнованной водной поверхности обусловлено совокупностью мелкой ряби с линейными размерами сравнимыми с длиной зондирующей радиоволны λ и характерной высотой $h \ll \lambda$, так что углы наклона ряби малы и отражение можно считать методом возмущений и крупных неровностей, рассеяние от которых можно считать методом Кирхгофа.

В обзорной статье [4] приводятся теоретические выражения для двухмасштабной модели рассеяния применительно к взволнованной морской поверхности, которые преимущественно используются исследователями в настоящее время. На примере большого экспериментального материала Г.Р. Валензуэла продемонстрировал корректность двухмасштабной модели для описания рассеяния радиоволн поверхностью моря в широком диапазоне углов

зондирования, длин радиоволн и скоростей ветра. Было отмечено, что модель плохо описывает случаи сильных ветров и скользящих углов зондирования. В частности, не объясняет высокий уровень рассеяния при скользящих углах на горизонтальной поляризации.

Наибольшее развитие модификация двухмасштабной модели получила в работах [5] в которой предложена полуэмпирическая модель УЭПР морской поверхности. Основным отличием данной модели от двухмасштабной является ряд параметров, которые настраиваются на конкретных данных, в основном это данные спутниковых РСА.

Двухмасштабная модель и её модификации хорошо описывают зависимость удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) морской поверхности от угла зондирования и диапазона длин радиоволн на горизонтальной и вертикальной поляризациях при углах зондирования θ , лежащих в диапазоне 20° - 80° . При скользящих углах зондирования ($\theta > 80^\circ$) необходимо учитывать рассеяние на обрушивающихся ветровых волнах, что было сделано в настоящей диссертационной работе.

Калмыков и Пустовойтенко [6] наблюдали, что значительная часть обратного рассеяния на горизонтальной поляризации при зондировании под скользящими углами формируется на гребнях морских волн, в то время как на вертикальной поляризации рассеяние распределено по всей поверхностной волне. В статье [7] приводится экспериментально найденная зависимость сечения обратного рассеяния морской поверхности от угла скольжения для радиоволн вертикальной поляризации длиной 3 см. Авторы показывают, что при учете связи между спектральной плотностью резонансной ряби и уклонами поверхности можно добиться хорошего совпадения экспериментальных данных с результатами двухмасштабной модели. Предпринимались попытки дополнить данную модель третьим масштабом. Калмыков и Пустовойтенко добавляли к двухмасштабной модели рассеяние на клине. В серии публикаций группы исследователей из ИКИ РАН под руководством Ю.А. Кравцова был рассмотрен вклад в суммарное рассеяние радиолокационного сигнала отражения от крутых обрушивающихся волн, размеры которых (высота 10-20 см, длина 1 м) занимают промежуточное положение между сантиметровыми и длинными (10 м и более) гравитационными волнами энергонесущей части спектра морского волнения [8-11]. Авторам удалось объяснить многие наблюдаемые закономерности обратного рассеяния на настильных углах, которые не находили своего объяснения в рамках резонансной Брэгговской теории. Следует отметить, что указанные работы описывают сам эффект рассеяния радиоволн на заостренном клине и не содержат зависимости от статистических характеристик обрушений.

Особенности доплеровских спектров рассеянного РЛ сигнала под скользящими углами зондирования также не находили объяснений в рамках двухмасштабной модели. В работах [12, 13] показано существенное отличие доплеровских спектров сигнала с вертикальной и горизонтальной поляризацией.

Авторы связывают этот эффект с рассеянием на структурах, которые образуются в процессе обрушения волн и обеспечивают поляризационную зависимость отраженной энергии.

Наряду с работами, посвященными развитию эмпирических и теоретических моделей рассеяния радиоволн на взволнованной водной поверхности, большое количество исследований направлено на решение обратной задачи РЛ зондирования – восстановление физических характеристик полей приводного ветра и ветрового волнения. Интенсивность радиолокационного сигнала, рассеянного взволнованной поверхностью моря, связана с шероховатостью этой поверхности. За рассеяние зондирующего сигнала отвечает определенная спектральная компонента ветрового волнения $k_{рез}$, а дополнительные условия приводят к флуктуациям отраженного сигнала. К дополнительным механизмам можно отнести неравномерное распределение в пространстве спектральной компоненты $k_{рез}$ связанное с неоднородностью поля приводного ветра и приповерхностных течений, наличие пленок поверхностно-активных веществ (ПАВ) на поверхности, нерезонансные механизмы (обрушения волн, пена, брызги), которые могут существенно влиять на уровень рассеяния. На малых масштабах, порядка длины энергонесущей волны, проявляется модуляция $k_{рез}$ орбитальной скоростью длинной волны, известная как гидродинамическая модуляция. Благодаря гидродинамической модуляции на радиолокационных изображениях морской поверхности, полученных с элементом разрешения меньше длины энергонесущей волны, становятся видны длинные поверхностные волны. На масштабах больших проявляются слики – явление выглаживания на морской поверхности, связанное с присутствием пленок поверхностно-активных веществ. Различают также пространственные неоднородности $k_{рез}$, связанные с неоднородностью поля ветра: ветровые тени и др. Неоднородные течения приводят к трансформации ветрового волнения в широком диапазоне длин поверхностных волн, что так же влияет на интенсивность РЛ сигнала.

Настоящая диссертация посвящена радиолокационным исследованиям при скользящих углах зондирования. Скользящие углы зондирования реализуются при работе радиолокационных систем с берега, с морских платформ или с судов. В качестве радиолокационной системы, работающей под скользящими углами, может выступать судовая радиолокационная станция (РЛС) [7], [14-16]. Ширина полосы обзора РЛС, установленной на судне, значительно ниже, чем у аналогичных систем, расположенных на самолетах и спутниках. Но в случае проведения комплексных синхронных измерений, которые дают более полную картину явлений, протекающих в океане, размещение РЛС на борту судна оказывается предпочтительней. Судовая РЛС имеет высокое пространственное разрешение и дает возможность в течение длительного времени наблюдать небольшие участки поверхности и, следовательно, изучать развитие медленных процессов.

К настоящему времени существуют методики восстановления поля приводного ветра с помощью данных судовых РЛС [17]. Кроме скорости ветра, по радиолокационным данным можно восстановить высоту волнения при стационарной установке РЛС, например, на платформе [18]. Описанные работы опираются на радиолокационные данные, полученные с установленных на нефтяных платформах РЛС. Обработка данных проводится с помощью прибора WamosII, который является разработкой компании OceanWaveS GmbH. Разработка подобных алгоритмов и оборудования, способного решать задачи дистанционного измерения характеристик поверхностного волнения, приводного ветра, неоднородных течений с помощью судовой РЛС, в том числе с движущегося судна, ведется и в России при непосредственном участии автора диссертации.

В значительной части работ, посвященных детектированию пленочных загрязнений на морской поверхности (сликов), используются данные активного дистанционного зондирования в СВЧ-диапазоне, такие как данные радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) [19], базирующихся на самолетах и спутниках, а также данные морских навигационных РЛС, установленных на нефтяных платформах и судах. Последние позволяют исследовать динамику поверхностного загрязнения. Детектирование пленок ПАВ с помощью навигационных РЛС в последнее время занимает важное место в экологическом мониторинге деятельности нефтедобывающих морских платформ. Такие известные коммерческие системы, как MIROS, sigma S6, SedarQ успешно выполняют задачу обнаружения нефтяных загрязнений в морских условиях (<http://www.miros.no>, <http://rutter.ca/sigma-s6>, <http://www.seadarq.com>). Известно, что пленки ПАВ становятся видимыми на радиолокационных изображениях морской поверхности, получаемых в СВЧ-диапазоне, благодаря гашению ими определенного участка спектра ветровых волн. Существуют модели, позволяющие оценивать радиолокационные контрасты для разных типов ПАВ [20]. Исследование динамики пленок ПАВ представляет большой интерес, связанный с необходимостью обнаружения загрязнений на морской поверхности (например, нефтяных разливов), прогнозированием вероятных сценариев дальнейшего развития ситуации и необходимостью идентификации вещества загрязнителя. Важнейшим и наиболее простым, с точки зрения определения, параметром пленочных сликов является их характерный размер [21]. Общепринятые теоретические модели разделяют процесс растекания пятен на характерные временные отрезки (режимы растекания). Каждый режим растекания соответствует тому или иному физическому механизму [22].

Внутренние волны (ВВ), как и пленки ПАВ, могут проявляться в РЛ сигнале благодаря изменению параметров шероховатости морской поверхности. В работе [23] на базе двухмасштабной модели рассеяния радиоволн с использованием кинематической модели и модели пленочного механизма воздействия ВВ на ветровое волнение получены количественные оценки вариации мощности СВЧ-сигналов, рассеиваемых морской поверхностью в присутст-

вии ВВ. Существуют работы посвященные наблюдению ВВ по данным РЛ зондирования с помощью судовых РЛС. В работе [24] проводится анализ данных радиолокационного зондирования с борта судна поверхностных проявлений ВВ в условиях распространения ВВ навстречу ветру. Получены эмпирические оценки зависимости передаточной функции ВВ-РЛ-сигнал от скорости ветра и периода ВВ. В работе [25] с помощью судовой РЛС зарегистрированы поверхностные проявления ВВ в Карском море. Наблюдение интенсивных внутренних волн (ИВВ) в ходе эксперимента СОРЕ с помощью РЛС, установленных на берегу, рассмотрено в работе [26]. Авторы работы приводят данные доплеровских РЛС на горизонтальной и вертикальной поляризации с длиной волны порядка 3 см и 8 мм. Обнаружено, что на горизонтальной поляризации проявления ИВВ имеют более глубокую модуляцию, чем на вертикальной. В работе [27] проводится численное моделирование трансформации поверхностного волнения в поле ИВВ, наблюдаемых в эксперименте СОРЕ. Дистанционная диагностика ИВВ - важная задача современной океанологии, что связано с существенным влиянием ИВВ на процессы перемешивания, безопасность подводных объектов и сооружений. Как показано в [28,29] ИВВ наблюдаются в прибрежных зонах приливных морей и могут достигать значительных амплитуд.

Наряду с ВВ на морской поверхности, а следовательно и в РЛ сигнале, могут проявляться неоднородные течения, связанные с обтеканием подводных возвышенностей, особенностей рельефа дна и т.п. Диагностика таких областей неоднородности течений - сложная и важная задача. При РЛ зондировании морской поверхности из космоса часто невозможно однозначно связать неоднородности в РЛ изображении с влиянием неоднородного течения или приводного ветра. Для решения такой задачи необходимо проводить комплексные натурные исследования, в которых измеряются гидрометеорологические условия с борта научного судна одновременно с РЛ съемкой.

Цель работы. В соответствии с изложенным выше кругом проблем, основной целью диссертационной работы является развитие метода радиолокационного зондирования морской поверхности под скользящими углами включающее:

1. Развитие эмпирико-теоретической модели рассеяния на взволнованной морской поверхности СВЧ радиоволн горизонтальной поляризации при зондировании под скользящими углами.
2. Разработка алгоритмов определения кинематических параметров ветрового волнения, скорости и направления ветра, оценки параметров пленочных загрязнений по данным судовой РЛС.
3. Теоретическое и экспериментальное исследование особенностей радиолокационной диагностики областей неоднородного течения при скользящих углах зондирования.
4. Развитие метода диагностики интенсивных внутренних волн по данным радиолокационного зондирования при скользящих углах.

Научная обоснованность и достоверность результатов, полученных в диссертации, обеспечивается сочетанием теоретических и экспериментальных исследований. В экспериментах использовались современные методы и подходы к постановке и проведению натурных исследований и обработке экспериментальных данных. Для теоретического моделирования применялись общепризнанные модели, в которых использовались разработанные автором параметризации.

Научная новизна диссертационной работы определяется полученными в ней оригинальными результатами:

1. Развита эмпирико-теоретическая модель рассеяния на взволнованной водной поверхности радиоволн СВЧ диапазона при скользящих углах зондирования, позволившая разработать алгоритмы восстановления кинематических параметров ветрового волнения, скорости и направления ветра, скорости течения по данным РЛС на неподвижном посту и на движущемся судне.
2. Предложена модификации приближенного метода описания взаимодействия составных солитонов уравнения Гарднера для исследования эволюции интенсивных внутренних волн в шельфовой области океанов и морей, получены радиолокационные портреты проявления ИВВ на морской поверхности, которые позволяют проводить экспресс – оценки параметров ИВВ.
3. Обнаружены и объяснены особенности растекания пленочного загрязнения – остановка процесса растекания пятна пленки на поверхности воды, последующее сжатие пятна и переход к стационарному состоянию.

Практическая значимость. Разработанные в диссертационной работе методы радиолокационного зондирования морской поверхности и алгоритмы восстановления характеристик подстилающей поверхности могут использоваться для дистанционного радиолокационного измерения кинематических параметров морского волнения, неоднородного течения, внутренних волн, в том числе ИВВ и скорости приводного ветра, как на стационарных береговых постах, так и с борта движущегося судна. Разработанная система радиолокационного зондирования проводила измерения в интересах Специализированного центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Черного и Азовского морей (СЦГМС ЧАМ Росгидромет) на Черном море в г. Сочи в течение 2013-2014 годов, а также в ходе десятка натурных экспедиций на различных акваториях. Результаты диссертации были использованы в ряде ОКР (СЧ ОКР “Анизотропия-ИПФ”, “Орел-ИПФ”, “Орел-ИПФ”-2, “Орел-ИПФ-3”, “Орел-ИПФ-4”) и НИР (СЧ НИР “Акватория-ПФ”, “Аракс-ИПФ”, “Листва-2020-Ф”, “Форпик”), выполняемых в ИПФ РАН, а также в ходе исследовательских работ в рамках грантов РФФИ (инициативные и региональные), проектов в рамках Федеральной целевой программы Минобрнауки «Мировой океан», гранта Правительства Российской Федерации, выделенного на конкурсной основе для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образо-

вательных учреждениях высшего профессионального образования (11.G34.31.0048).

Положения, выносимые на защиту.

1. Предложенная эмпирико-теоретическая модель рассеяния радиоволн СВЧ диапазона на взволнованной морской поверхности при скользящих углах зондирования описывает особенности зондирования морской поверхности с помощью судовой РЛС в широком диапазоне скоростей ветра.
2. Разработанные в диссертации алгоритмы на основе радиолокационного зондирования морской поверхности под скользящими углами позволяют определить кинематические параметры ветрового волнения, скорости и направления ветра, параметры пленочных загрязнений по данным судовой РЛС. Алгоритмы применимы как при работе РЛС на стационарных береговых постах, так и с борта движущегося судна.
3. Обнаруженные в ходе комплексных натуральных экспериментов с помощью радиолокационного зондирования особенности аномалий на морской поверхности в поле локализованного двумерно-неоднородного течения получили свое объяснение в рамках проведенного численного моделирования трансформации ветрового волнения и мощности отраженного радиолокационного сигнала в поле измеренных течений.
4. Предложенная модификация приближенного метода описания взаимодействия составных солитонов уравнения Гарднера может быть использована для исследования эволюции интенсивных внутренних волн в шельфовой области океанов и морей. Полученные на основе теоретического моделирования радиолокационные портреты проявления ИВВ на морской поверхности позволяют проводить экспресс – оценки параметров ИВВ.
5. На основе радиолокационного зондирования под скользящими углами обнаружены особенности растекания пленочного загрязнения – остановка процесса растекания пятна пленки на поверхности воды, последующее сжатие пятна и переход к стационарному состоянию.

Публикации и апробация результатов.

Основные результаты диссертации опубликованы в 20 статьях в реферируемых журналах и сборниках трудов конференций и были представлены на следующих конференциях: EGU General Assembly (2010, 2011 гг.); International Geoscience and Remote Sensing Symposium (2009 г.); Pan Ocean Remote Sensing Conference (2010 г.); International Conference of Young Scientists Land-Ocean-Atmosphere Interactions in the Changing World, (2011 г.); 5th International Geosciences Student Conference (2014 г.); SPIE Remote Sensing (2011, 2014 г.); XXVII Всероссийский симпозиум “Радиолокационное исследование природных сред” (2011, 2013 гг.); X ВСФПТПМ (2011 г.); XX Научная сессия Совета РАН по нелинейной динамике; Всероссийская конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса” (2009, 2010, 2011, 2013 гг.); Первая Всероссийская конференция по прикладной океанографии (2010 г.).

Личный вклад автора.

Все приведенные в диссертации результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор непосредственно занимался разработкой эмпирико-теоретической модели радиолокационного рассеяния радиоволн на взволнованной водной поверхности и участвовал в разработке теоретической модели приближенного описания эволюции солитонов ИВВ в шельфовой зоне, включая программную реализацию и экспериментальную апробацию. Экспериментальные результаты получены в ходе натуральных экспедиций, в организации и проведении которых автор принимал непосредственное участие.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и двух приложений. Общий объем работы – 101 страница, включая 52 рисунка и список литературы из 92 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во **введении** освещается современное состояние рассматриваемых в диссертации проблем, обосновываются актуальность темы работы и ее практическая значимость, кратко излагается ее содержание, формулируются положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор литературы, посвященной исследуемой тематике. В диссертационной работе используются общепринятые теоретические модели, основные выражения которых приводятся в первой главе. В § 1.1 рассмотрены теоретические основы радиолокационного зондирования морской поверхности. Как показано в [5] УЭПР морской поверхности в двухмасштабной модели рассеяния определяется как

$$\sigma_{0R} = \int \sigma_{0br}(\theta - \eta_i) P(\eta_i) d\eta_i. \quad (1)$$

В данном выражении $\sigma_{0br}(\theta) = 16\pi k_r^4 |G_p(\theta)|^2 W_r(k_b, \phi)$ - УЭПР в приближении Брэгговского рассеяния, где k_r - волновое число электромагнитной волны; θ - локальный угол падения; ϕ - угол между направлением визирования радара и направлением скорости ветра; $|G_p|^2$ - геометрический коэффициент отражения; $k_b = 2k_r \sin \theta$ - локальное волновое число Брэгговской волны; $W_r(k_b, \phi)$ - двумерный пространственный спектр возвышений поверхности; $P(\eta_i)$ - функция плотности вероятности распределения уклонов морской поверхности в направлении зондирования.

В § 1.2 рассмотрены вопросы особенностей рассеяния под скользящими углами зондирования. Как показано рядом авторов, наряду с резонансным рассеянием необходимо учитывать вклад нерезонансной компоненты рассеяния в суммарную УЭПР [11]: $\sigma_0 = \sigma_0^{res} + \sigma_0^{nonres}$. К появлению нерезонансной компоненты приводит рассеяния на заостренных гребнях обрушающихся волн, на самих обрушениях, на пене и брызгах. УЭПР морской поверхности

можно представить суммой УЭПР регулярных волн σ_{0R} (1) и обрушивающихся волн σ_{0b} [5]:

$$\sigma_0 = \sigma_{0R}(1-q) + \sigma_{0b}q, \quad (2)$$

где q - доля морской поверхности, покрытая обрушениями.

Наибольшее влияние перечисленные явления оказывают на рассеяние радиоволн сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн при скользящих углах зондирования. В дециметровом и метровом диапазоне радиоволн рассеяние можно считать без учета дополнительного слагаемого.

Параметры шероховатости морской поверхности связаны не только с полем приводного ветра, но и с полем приповерхностного течения. В § 1.3 приводятся описания экспериментальных и теоретических исследований проявлений неоднородных течений на морской поверхности. Для описания волнения на неоднородном течении используется понятие пространственного амплитудного спектра $W(\vec{r}, \vec{k}, t)$. Эволюция спектров ветровых волн в рамках кинематической модели описывается кинетическим уравнением для спектральной плотности волнового действия поверхностных волн $N(\vec{r}, \vec{k}, t) = W(\vec{r}, \vec{k}, t) / \sqrt{g|\vec{k}|}$:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \dot{\vec{r}} \frac{\partial N}{\partial \vec{r}} + \dot{\vec{k}} \frac{\partial N}{\partial \vec{k}} = S, \quad (3)$$

где $\dot{\vec{r}} = \frac{\partial \omega(\vec{r}, \vec{k}, t)}{\partial \vec{k}}$, $\dot{\vec{k}} = -\frac{\partial \omega(\vec{r}, \vec{k}, t)}{\partial \vec{r}}$, ω - частота поверхностной волны,

которую в случае наличия течения можно представить в виде $\omega = \sqrt{g|\vec{k}|} + \vec{k}\vec{U}$. В рассматриваемых задачах предполагается квазистационарность поля течения, к примеру, сформированного медленной приливной волной, при этом сохраняется частота волнового пакета ω .

Член S в уравнении (3) описывает действие ветра и вязкости на поверхностные волны и учитывает их нелинейность. Наиболее распространен вид S

в релаксационном приближении: $S = \alpha N - \frac{\alpha N^2}{N_0}$, где $N_0(\vec{k})$ - спектральная

плотность волнового действия в невозмущенном состоянии, $\alpha(\vec{k}, \vec{U}_{10})$ - инкремент нарастания ветровых волн, \vec{U}_{10} - скорость ветра.

Внутренние волны, как и пленки ПАВ, могут проявляться в РЛ сигнале благодаря изменению параметров шероховатости морской поверхности. Дистанционная диагностика ИВВ важная задача современной океанологии, что

связано с существенным влиянием ИВВ на процессы перемешивания, безопасность подводных объектов и сооружений. Как показано в [28] ИВВ наблюдаются в прибрежных зонах приливных морей и могут достигать значительных амплитуд. В § 1.4 рассмотрены работы, посвященные описанию эволюции ИВВ в шельфовой зоне морей. В § 1.5 приводится заключение к первой главе.

Вторая глава посвящена развитию модели радиолокационного рассеяния на взволнованной морской поверхности под скользящими углами зондирования и алгоритмов восстановления параметров подстилающей поверхности. Основные результаты второй главы опубликованы в работах [1*-13*]. В § 2.1 обсуждается модернизация эмпирико-теоретической модели рассеяния радиолокационных сигналов морской поверхностью применительно к скользящим углам зондирования. На основе двухмасштабной модели рассеяния электромагнитных волн с учетом влияния обрушений ветровых волн проведено численное моделирование удельной эффективной площади рассеяния взволнованной водной поверхности при углах падения $\theta \geq 80^\circ$. При моделировании рассеяния радиолокационного излучения морская поверхность описывалась спектром Elfouhaily, который зависел от возраста волнения и скорости ветра. Для описания доли морской поверхности, покрытой обрушениями, было предложено эмпирическое выражение как функция скорости ветра на стандартной высоте. Используя данные работы [30] была получена зависимость доли морской поверхности, покрытой обрушениями, от скорости ветра. На рис. 1а проведена полиномиальная аппроксимация следующей формулой: $q(\%) = -0.4 + 0.05U_{10} + 0.006U_{10}^2$. Такая аппроксимация дает значения, согласующиеся с результатами лабораторных измерений доли обрушающегося волнения с помощью скаттерометра X-диапазона [8*],[13*].

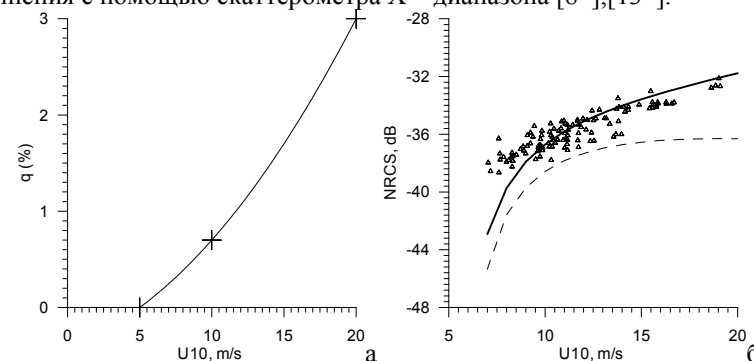


Рис. 1. Зависимость доли морской поверхности, покрытой обрушениями, от скорости ветра – а. Сопоставление экспериментальных данных с результатами эмпирико-теоретической модели – б. Угол зондирования 85 градусов. Пунктирная линия – двухмасштабная модель, сплошная линия – модель с учетом обрушений, символы – экспериментальные данные

На рис. 1б продемонстрировано хорошее согласие результатов моделирования УЭПР взволнованной поверхности при скользящих углах наблюдения с экспериментальными данными, полученными с помощью некогерентной судовой радиолокационной станции X – диапазона горизонтальной поляризации. Данные радиолокационного зондирования были получены в ходе натуральных экспериментов в Черном и Карском морях. Показано, что экспериментальная зависимость мощности отраженного взволнованной поверхностью радиосигнала при скользящих углах зондирования хорошо описывается степенной функцией скорости ветра.

Описанная модель может быть использована для решения обратных задач дистанционного зондирования.

Развитию алгоритмов определения кинематических параметров ветрового волнения, волн зыби и определения параметров приводного ветра с движущегося судна посвящен § 2.2. Временные серии РЛ панорам морской поверхности $I(x, y, t)$ обрабатываются с помощью 3-мерного Фурье-преобразования

$$\hat{S}(k_x, k_y, \omega) = \iiint I(x, y, t) \cdot e^{-i\omega t} e^{i(k_x x + k_y y)} dx dy dt,$$

в результате чего получается трехмерный спектр РЛ изображений. Одномерные пространственные, частотные или угловые спектры получаются путем интегрирования по оставшимся переменным. Зависимость мощности отраженного радиолокационного сигнала, которая пропорциональна УЭПР морской поверхности, хорошо описывается степенной функцией скорости ветра: $\sigma_0 = A(\theta) \cdot U_{10}^{\delta(\theta)}$. При определении коэффициентов $A(\theta), \delta(\theta)$ для текущего места измерения позволит восстановить скорость ветра по измерениям радиолокатора.

В § 2.3 рассматривается динамика растекания искусственного слика в режиме поверхностного натяжения (при низкой поверхностной концентрации ПАВ) в натуральных условиях в ходе экспедиционных работ на Горьковском водохранилище. С помощью развитого метода радиолокационного зондирования обнаружен новый эффект – переход на достаточно больших временах от режима растекания пленки ПАВ к режиму ее сжатия с последующим установлением стационарного состояния – стационарного масштаба пятна. На рис. 2а приведены зависимость площади пятна от времени, полученная с помощью метода РЛ зондирования под скользящими углами. Фрагмент РЛ изображения пятна пленки ПАВ приведен на рис. 2б.

Представлены результаты наблюдений эффекта компрессии пленки и предложено физическое объяснение эффекта, основанное на действии индуцированных ветровыми волнами напряжений и учете изменения характеристик пленки в процессе ее растекания. В § 2.4 приводится заключение ко второй главе.

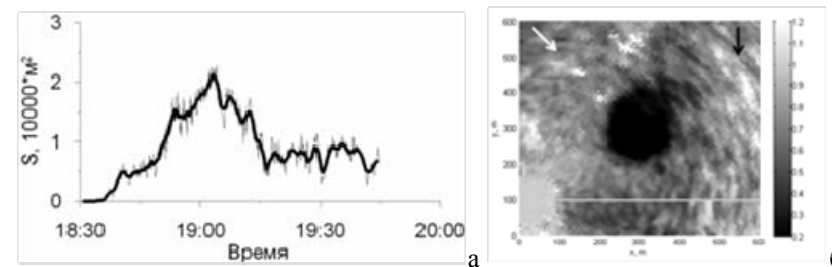


Рис. 2. Зависимость площади пятна от времени – а, нормированная РЛ панорама морской поверхности с пятном ПАВ в 19:00 – б.

Третья глава содержит результаты теоретических и экспериментальных радиолокационных исследований проявления неоднородных течений на морской поверхности, которые опубликованы в работах [14*-20*]. В § 3.1 содержится описание и результаты комплексных натурных экспедиций по исследованию трансформации поверхностного волнения в поле неоднородных течений. В северо-восточной части исследуемого полигона Белого моря было выбрано два района с глубинами 50 – 100 м и одиночными подводными возвышенностями, глубина над вершинами которых составляла 10 м. Для выбранных районов измерений характерно южное направление течения во время прилива и северное во время отлива. В ходе исследований в данных районах было обнаружено, что течение во время прилива, когда скорость основного потока достигает 1 м/с, существенно трансформируется над областью подводной возвышенности. Во время отлива, когда основной поток не превышает 50 см/с, влияние рельефа дна существенно слабее. В § 3.2 приводятся результаты теоретического моделирования влияния неоднородного течения, измеренного в натуральных условиях, на характеристики поверхностного волнения на основе решения кинетического уравнения для спектральной плотности волнового действия поверхностных волн. На рис. 3а и 3б приведен вид течения, наблюдаемого на северном и южном полигонах Белого моря. Течение на рисунках направлено на юг, скорость ветра, наблюдаемая в экспериментах и используемая при моделировании на рис. 3а 4 м/с ЮЗ, на рис. 3б – 8 м/с СВ. На рис. 3в и 3г приведены результаты численного моделирования в виде отношения полученной спектральной плотности волновой компоненты к её невозмущенному значению для северного и южного полигона, соответственно. Представлены результаты для нескольких волновых чисел в диапазоне волновых чисел левее спектрального пика до волновых чисел на порядок превышающих его значение. Спектральная плотность волновых чисел вблизи спектрального пика наиболее сильно трансформируется неоднородным течением благодаря более слабой релаксации к своему невозмущенному значению относительно более коротких поверхностных волн. С наветренной стороны подводной возвышенности при встречном течении наблюдается усиление

волнение, с подветренной – ослабление, при этом изменчивость амплитуды спектральных компонент достигает 50%. В случае попутного волнению течения контрасты амплитуды не превышают 10%. Наибольшее ослабление волнения наблюдается при максимальном градиенте в случае попутного течения. При встречном течении в области максимального градиента наблюдается наибольшее усиление волнения.

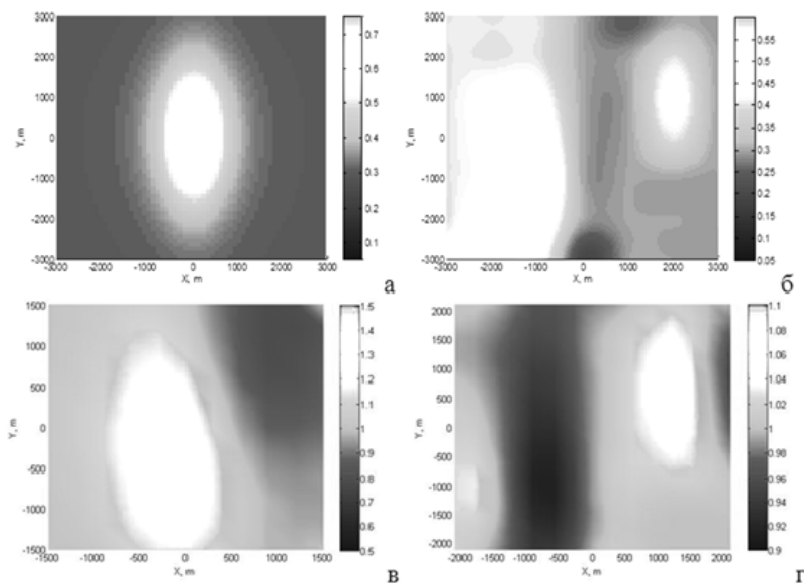


Рис. 3. Вид двумерно – неоднородных течений на северном полигоне – а, на южном полигоне – б во время прилива. Цветовая шкала соответствует скорости течения в м/с. Распределение отношения спектральной плотности пространственного спектра возвышений к невозмущенному значению для волнового числа 1 рад/м для северного полигона – в, для южного полигона – г.

В § 3.3 сопоставляются результаты теоретического моделирования изменчивости УЭПР поверхностного волнения на неоднородном течении относительно невозмущенного значения с нормированными экспериментальными данными по радиолокационному зондированию под скользящими углами (рис. 4). На радиолокационных панорамах морского волнения неоднородные течения проявляются в виде областей усиления или ослабления радиолокационного сигнала. Пространственные размеры области вариации радиолокационного сигнала соизмеримы с размерами неоднородностей поля течения. На некотором расстоянии от области неоднородных течений уровень радиолокационного сигнала сравнивается со своим фоновым значением, что говорит о релаксации коротковолнового диапазона спектра ветрового волнения к невозмущенному течением состоянию. Наблюдаемые в натурных экспериментах неоднородности радиолокационного сигнала объясняются результатами

теоретического моделирования. В § 3.4 приводится заключение к третьей главе.

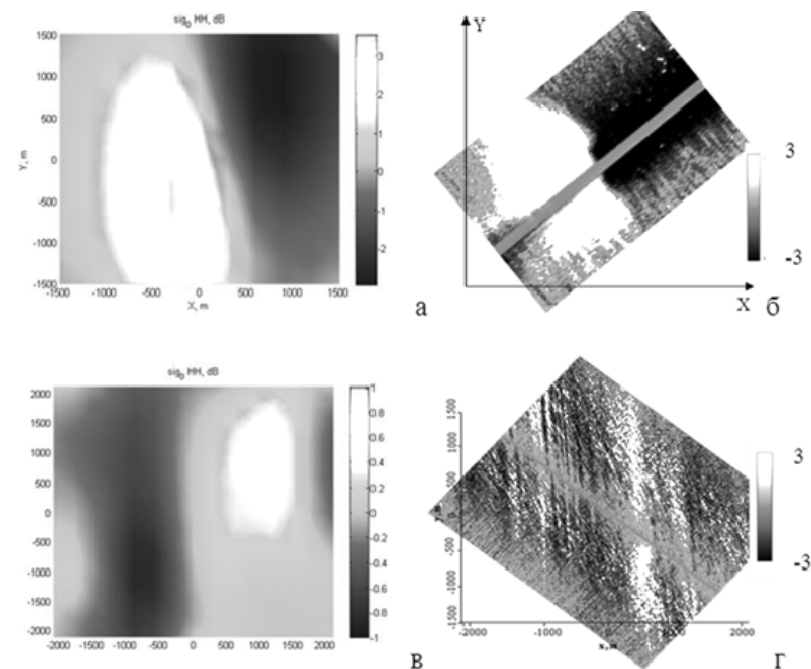


Рис. 4. Теоретическое распределение изменчивости УЭПР поверхностного волнения на неоднородном течении относительно невозмущенного значения для северного полигона – а, для южного полигона – в; нормированная радиолокационная панорама морской поверхности для северного полигона – б, для южного полигона – г. Шкала яркости дана в дБ.

Четвертая глава посвящена приближенному описанию эволюции солитонов ИВВ в шельфовой зоне и теоретическим расчетам их радиолокационных портретов. Основные результаты четвертой главы опубликованы в работах [21*-25*]. В § 4.1 в рамках уравнения Гарднера с переменными коэффициентами, обусловленными неоднородной гидрологией:

$$\Phi_t + \Phi(\alpha(x, t) - \mu(x, t)\Phi)\Phi_x + \beta(x, t)\Phi_{xxx} = 0$$

построено приближенное решение, описывающее распространение солитона ИВВ. В основе предложенного описания лежит представление солитонов уравнения Гарднера совокупностью кинков (перепадов поля) разной полярности

$$\phi_k(x, t) = \bar{\phi} + \frac{\phi_m}{2} [1 \pm th \lambda_m (x - v_m t)], \lambda_m = \frac{\phi_m}{2} \sqrt{\frac{\mu}{6\beta}}, \phi_m = \alpha / \mu - 2\bar{\phi}.$$

Построенные приближенные решения позволяют исследовать существенно неквазистационарные процессы, возникающие при распространении солитонов ИВВ в шельфовой зоне. Подробно описана задача о прохождении уединенной волной “критической” точки (соответствует ситуации, когда $a=0$), в которой традиционное квазистационарное описание неприменимо. Сравнение распределений полей, полученных в рамках приближенного подхода и прямого численного интегрирования уравнения Гарднера, демонстрирует не только качественное, но и количественное соответствие между ними.

В § 4.2 проведен расчет поля течения на поверхности моря (рис. 5), создаваемого солитоном ИВВ в разные моменты времени для реального случая распространения на шельфе полуострова Камчатка [29].

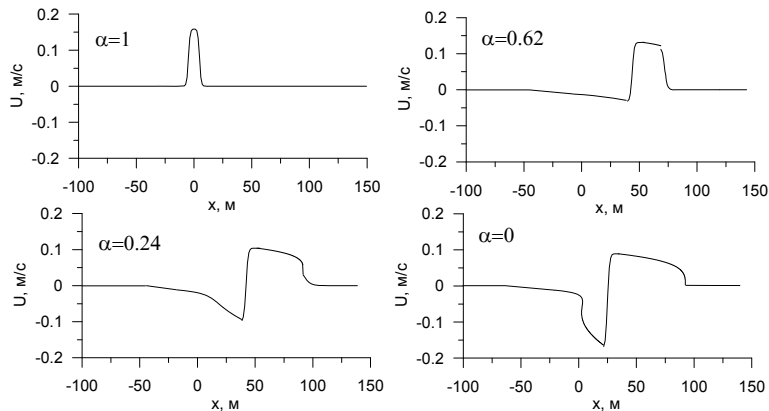


Рис. 5. Рассчитанные скорости поверхностного течения в поле ИВВ на различных стадиях эволюции.

На основе разработанной модели радиолокационного рассеяния и кинетического уравнения для спектральной плотности волнового действия поверхностных волн в § 4.3 теоретически рассчитаны радиолокационные портреты ИВВ в шельфовой зоне, которые могут быть зарегистрированы береговыми РЛС. Проведенные расчеты демонстрируют высокие РЛ контрасты рассматриваемого явления – проявления солитона ИВВ на морской поверхности при распространении на шельфе. Следует отметить, что по РЛ панорамам можно восстановить основные параметры солитона ИВВ – это скорость распространения, распределение знака течения по РЛ контрасту, пространственный размер солитона ИВВ. Все вместе делает РЛС эффективным средством диагностики ИВВ на шельфе. В § 4.4 приводится заключение к четвертой главе.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты диссертации

1. Развита эмпирико-теоретическая модель рассеяния радиоволн СВЧ диапазона взволнованной водной поверхностью при скользящих углах зондирования. В модели учтено рассеяние от обрушивающихся ветровых волн, для чего предложено эмпирическое выражение, параметризующее зависимость площади морской поверхности, занятой обрушениями, от скорости ветра. Проведена апробация модели на большом массиве экспериментальных данных, полученных в натуральных условиях.
2. Развита метод радиолокационного зондирования морской поверхности под скользящими углами, заключавшийся в использовании судовой РЛС и применении разработанных алгоритмов восстановления кинематических параметров ветрового волнения (направление распространения, длина и частота энергонесущей волны), скорости и направления ветра, оценки скорости течения по данным РЛС на неподвижном посту и на движущемся судне.
3. В ходе натуральных экспериментов на основе радиолокационного зондирования обнаружена особенность растекания пленочного загрязнения – остановка процесса растекания пятна пленки на поверхности воды, последующее сжатие пятна и переход к стационарному состоянию. Предложено физическое объяснение эффекта, в основе которого лежит учет индуцированных ветровыми волнами поверхностных напряжений, которые могут изменять режим растекания.
4. Развита метод диагностики областей неоднородных течений вблизи морской поверхности с помощью радиолокационного зондирования под скользящими углами. В ходе комплексных натуральных экспериментов были зарегистрированы аномалии на морской поверхности, связанные с влиянием локализованного двумерно-неоднородного течения. Данные аномалии получили свое объяснение в рамках проведенного численного моделирования трансформации ветрового волнения и мощности отраженного радиолокационного сигнала в поле измеренных двумерно-неоднородных течений.
5. Предложена модификация приближенного метода описания взаимодействия составных солитонов уравнения Гарднера для исследования эволюции интенсивных внутренних волн (ИВВ) в шельфовой области океанов и морей. На основе теоретического моделирования получены радиолокационные портреты проявления ИВВ на морской поверхности, которые позволяют проводить экспресс – оценки параметров ИВВ.

Список цитированной литературы

1. Fois Franco. Enhanced Ocean Scatterometry. Doctor of Philosophy in Geoscience & Remote Sensing, Faculty of Civil Engineering and Geosciences. Delft University of Technology. 2015.

2. Elfouhaily T.M., Guerin C.A.. A critical survey of approximate scattering wave theories from random rough surfaces// *Waves in Random Media*. 2004. 14. R1-R40.

3. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972.

4. Valenzuela G.R. Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves – a review // *Boundary-Layer Meteorology*. 1978. Vol. 13. P. 61-85.

5. Kudryavtsev V., Hauser D., Gaudal G., Charpon B. A semiempirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface, 1, Background model // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108(C3). P. 8054.

6. Kalmykov A. I. and Pustovoytenko V. V. On Polarization Features of Radio Signals Scattered from the Sea Surface at Small Grazing Angles // *J. Geophys. Res.* 81, 1960-1964, 1976.

7. Гуськов М.П., Жидко Ю.М., Иванова Г.К., Рябинин А.Г., Шихов О.А.. Рассеяние радиоволн трехсантиметрового диапазона морской поверхностью при малых углах скольжения // *Известия высш. уч. зав. – Радиофизика*. Том 33, № 9, 1990 г., с. 1013-1019.

8. 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 // *Успехи Физических Наук*. 2003. 173 (1). С. 69-87.

9. Churyumov A.N., Kravtsov Yu.A., Lavrova O.Yu., Litovchenko K.Ts., Mityagina M.I., Sabinin K.D. Signatures of resonant and non-resonant scattering mechanisms on radar images of internal waves // *International Journal of Remote Sensing*. 2002. Vol. 23. № 20. P. 4341 – 4355.

10. Кравцов Ю.А., Литовченко К.Ц., Митягина М.И., Чурюмов А.Н. Резонансные и нерезонансные явления при микроволновом дистанционном зондировании поверхности океана // *Радиотехника*. 2000. № 1. С. 61-73.

11. Кравцов Ю.А., Митягина М.И., Чурюмов А.Н. Нерезонансный механизм рассеяния электромагнитных волн на морской поверхности: рассеяние на крутых заостренных волнах // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. 1999. Т. 42. № 3. С. 240-254.

12. Каневский М.Б., Караев В.Ю., Лубяко Л.В., Зуйкова Э.М., Титов В.И., Гольдблат В.Ю., Баландина Г.Н. Доплеровские спектры сантиметровых и миллиметровых радиоволн, рассеянных водной поверхностью под малыми углами скольжения // *Известия высш. уч. зав. – Радиофизика*. Том XLIV, № 11, 2001 г., с. 922-930.

14. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Сколника. Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. (в четырех томах) под общей ред. К.Н. Трофимова. Том 1. Основы радиолокации. Под ред. Я.С. Иццоки. М., “Сов. радио”, 1976, 456 с.

15. Жидко Ю.М., Калмыков А.И., Каневский М.Б., Пичугин А.П., Цымбал В.Н. Радиолокационное зондирование океана // *Дистанционные методы исследования океана*. Горький: ИПФ АН СССР, 1987. С. 5-33.

16. Гуськов М.П., Жидко Ю.М., Родин В.В., Русакова И.А., Шихов О.А.. Экспериментальные исследования анизотропии обратного рассеяния радиоволн сантиметрового диапазона морской поверхностью при малых углах скольжения // *Известия высш. уч. зав. – Радиофизика*. Том XXXI, № 11, 1988 г., с. 1318-1330.

17. Dankert H., Horstmann J., and Rosenthal W.. Ocean wind fields retrieved from radar-image sequences // *Journal of Geophysical research*, vol. 108, no. C11, 3352, doi:10.1029/2003JC002056, 2003

18. Dankert H., Horstmann J., and Rosenthal W. Wind – and wave – field measurements using marine X-band radar-image sequences // *IEEE Journal of oceanic engineering*, vol. 30, no. 3, July 2005. pp. 534-542.

19. Лаврова О.Ю., Серебряный А.Н., Митягина М.И., Бочарова Т.Ю. Подспутниковые наблюдения мелкомасштабных гидродинамических процессов в северо-восточной части Черного моря // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10. № 4. С. 308–322.

20. Ермаков С.А. Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн. Н.Новгород: ИПФ РАН. 2010. 164 с.

21. Gade M., Huehnerfuss H., Korenowski G. Marine surface films. Springer. 2006. 341 p.

22. Fay J.A. The spread of oil slicks on a calm sea // Houtl, D.P. (ed.), *Oil on the Sea*. Plenum New York. 1969. P. 53–63.

23. Баханов В.В., Зуев А.Л., Маров М.Н., Пелиновский Е.Н. Влияние внутренних волн на характеристики СВЧ-сигналов, рассеиваемых морской поверхностью // *Известия АН СССР ФАО*, Том 25, №4, 1989, С. 387-395.

24. Бурдюгов В.М., Верещак А.И., Гродский С.А., Кудрявцев В.Н., Малиновский В.В. Оценки параметров внутренних волн по радиолокационному сигналу // *Известия АН СССР ФАО*, Том 23, №8, 1987, С. 877-892.

25. Morozov E.G., Paika V.T., Bakhanov V.V. Strong internal tides in the Kara Gates Strait // *Geophys. Res. Lett.*, 35, L166603, 2008.

26. Kropfli R.A., Ostrovski L.A., Stanton T.P., Skirta E.A., Keane A.N., and Irisov V. Relationships between strong internal waves in the coastal zone and their radar and radiometric signatures // *J. Geophys. Res.*, 104(C2), P. 3133-3148, 1999.

27. Bakhanov V.V. and Ostrovsky L.A. Action of strong internal solitary waves on surface waves // *J. Geophys. Res.*, 107(C10). 3139, 2002.

28. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. “Горячие точки” в поле внутренних волн в океане // *Акустический журнал*, 2007, том 53, №3, с. 410-436

29. Серебряный А.Н., Пао К.П. Прохождение нелинейной внутренней волны через точку переворота на шельфе // Докл. РАН. 2008. Т. 420, № 4, с. 543-547.

30. Anguelova M., Webster F. Whitecap coverage from satellite measurements: A first step toward modeling the variability of oceanic whitecaps // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111C. P. 3017.

Список публикаций по теме диссертации

1*. Ермаков С.А., Ермошкин А.В., Капустин И.А. Об эффекте сжатия пленочного слага // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Одобрена к печати.

2*. Ермошкин А.В., Баханов В.В., Богатов Н.А. Развитие эмпирико-теоретической модели рассеяния радиолокационных сигналов взволнованной водной поверхностью при скользящих углах наблюдения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 4. С. 51-59.

3*. Ермошкин А.В., Капустин И.А. Исследование особенностей растекания пленок поверхностно-активных веществ на поверхности внутренних водоемов морским навигационным радиолокатором // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 113-119.

4*. Ивонин Д.В., Телегин В.А., Азаров А.И., Ермошкин А.В., Баханов В.В.. Определение вектора скорости течения по измерениям навигационного радара с широкой диаграммой направленности антенны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011, Т. 8, № 4. С. 219-227

5*. Телегин В.А., Баханов В.В., Ермошкин А.В., Курганский М.В., Рождественская В.Н., Трубицын А.В. Наблюдения смерча некогерентным радиолокатором X-диапазона // Научные технологии. 2017. № 2. С. 28-36.

6*. Гарбацевич В.А., Ермошкин А.В., Иванов И.И., Телегин В.А. Измерение пространственно-временных характеристик морского волнения навигационными РЛС малой мощности // Гелиогеофизические исследования. № 13. 2015. С. 91-96.

7*. Баханов В.В., Ермошкин А.В., Кемарская О.Н., Телегин В.А. О возможности использования судовой радиолокационной станции в гидрофизических исследованиях // Труды XXVII Всероссийского симпозиума "Радиолокационное исследование природных сред", 2012, т.1, вып.9, с.143-151

8*. Баханов В.В., Богатов Н.А., Ермошкин А.В., Кемарская О.Н. Лабораторные исследования модуляции обрушений коротких ветровых волн в поле длинной поверхностной волны. Труды XXVIII Всероссийского симпозиума "Радиолокационное исследование природных сред", Санкт-Петербург, 2013 г., т.1, вып.10, с.236-245

9*. Ivonin D. V., Telegin V. A., Bakhanov V.V., Ermoshkin A.V., and Azarov A.I. Monitoring system of surface currents on the base of low-cost X-band radar. First application on the Black Sea // RUSSIAN JOURNAL OF EARTH SCIENCES, VOL. 13, ESES1001000, doi:10.2205/2009ES000245, 2011

10*. Ivonin D.V., Bakhanov V.V., Ermoshkin A.V., Telegin V.A.. Measurements of Velocity Vector of Surface Currents by Means of Nautical Radar Furuno 1832. Materials of the 16th Session of International conference "Fluxes and Structures in Fluids: Physics of Geospheres", Vladivostok, 25-30 September, 2011, pp. 83-85.

11*. Ивонин Д.В., Овечкин В.Е., Баханов В.В., Ермошкин А.В., Телегин В.А. Возможность определения параметров морского волнения по измерениям некогерентного навигационного радара СВЧ диапазона // Труды Международной научной конференции "Излучение и рассеяние электромагнитных волн" ИРЭМБ - 2009. г. Геленджик, 27 июня-1 июля 2009г, 5с., 2009

12*. Bogatov N.A., Bakhanov V.V., Ermoshkin A.V., Kazakov V.I., Kemarskaya O.N., Titov V.I., Troitskaya Y.I. Using of standard marine radar for determination of a water surface and an atmosphere near surface layer parameters // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 2014. С. 924013.

13*. Bakhanov V.V., Bogatov N.A., Ermoshkin A.V., Kandaurov A.A., Kemarskaya O.N., Sergeev D.A., Troitskaya Yu.I. Laboratory investigation of short wind wave breaking modulation in the long surface wave field // Proceedings SPIE 8888, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions. 2013. P. 888809.

14*. Баханов В.В., Богатов Н.А., Волков А.С., Ермошкин А.В., Зуйкова Э.М., Казаков В.И., Кемарская О.Н., Лобанов В.Н., Репина И.А., Титов В.И. Натурные исследования масштабов изменчивости гравитационно-капиллярных волн и приводного ветра в шельфовой зоне черного моря // Известия РАН, ФАО, 2010, том 46, № 2, с. 255-262.

15*. Григоренко К.С., Хартиев С.М., Соловьева А.А., Ермошкин А.В. Исследование кинематических характеристик внутренних волн в центральной Атлантике по данным CTD – профилирования // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2015. № 1. С. 41-50.

16*. Bakhanov V., Titov V., Ermoshkin A., Bogatov N., Zhu M., Chong J., Wang X.. Laboratory studies by the optical means of wind wave characteristics and its transformation in internal wave field. Proceedings VI International Conference "Current Problems in Optical of Natural Waters", Saint-Petersburg, "Nauka", 2011, p. 219-221, 269-271.

17*. Bakhanov V.V., Bogatov N.A., Ermoshkin A.V., Ivanov A.Yu., Lobanov V.N., Kemarskaya O.N., Titov V.I. Full-scale investigations of the action of internal waves and inhomogeneous currents on the wind waves in the White Sea. Proceedings of SPIE Volume: 8175, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal

Waters, and Large Water Regions 2011, Editors, 81750L, DOI: 10.1117/12.898364.

18*. Баханов В.В., Волков А.С., Ермошкин А.В., Зуйкова Э.М., Кемарская О.Н., Репина И.А., Титов В.И. Натурные исследования изменчивости поверхностного волнения и приводного ветра в районе шельфа // Материалы третьей межведомственной конференции “Проявление глубинных процессов на морской поверхности”. 2008. С. 16-24.

19*. Bakhanov V.V., Bogatov N.A., Ermoshkin A.V., Zuikova E.M., Kazakov V.I., Kemarskaya O.N., Repina I.A., Titov V.I., Troitskaya Yu. I. Subsatellite experiments in the north-eastern part of the Black sea // IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, July 12-17, 2009, Cape Town, South Africa, Symposium Proceedings. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., pp. III-188 – III191, 2009

20*. Bakhanov V.V., Bogatov N.A., Ermoshkin A.V., Kemarskaya O.N., Titov V.I., Ivanov A.Y. Study on wind wave variability by inhomogeneous currents in the closed seas // Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2012. С. 85320N.

21*. Ермошкин А.В. Динамика интенсивных внутренних волн в Японском и Охотском морях с использованием спутниковых данных // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, №4 часть 2. с. 430-432.

22*. Горшков К.А., Соустова И.А., Ермошкин А.В., Зайцева Н.В. Эволюция составного солитона уравнения Гарднера с переменными коэффициентами. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2012. Т. XLV, № 5. С. 324-337.

23*. Gorshkov, K.A., Soustova, I.A., Ermoshkin, A.V. Field Structure of a Quasisoliton Approaching the Critical Point // Radiophysics and Quantum Electronics, March 2016, Volume 58, Issue 10, pp 738–744.

24*. Горшков К.А., Соустова И.А., Ермошкин А.В., Зайцева Н.В. О приближенном описании неквазистационарной эволюции солитонов внутренних волн, близких к предельным, в рамках уравнения Гарднера с переменными коэффициентами // Фундаментальная и прикладная гидрофизика, 2013, Т.6, № 3, с. 54-62.

25*. Горшков К.А., Дубина В.А., Ермошкин А.В., Соустова И.А., Троицкая Ю.И. Анализ эволюции интенсивных внутренних волн в Японском и Охотском морях с использованием данных радиолокатора с синтезированной апертурой и радиометров // Труды Государственного океанографического института. 2011. № 213. С. 234 – 243.

ЕРМОШКИН Алексей Валерьевич

ДИАГНОСТИКА ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОКЕАНЕ НА ОСНОВЕ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОД СКОЛЬЗЯЩИМИ УГЛАМИ

Автореферат

Ответственный за выпуск

А. В. Ермошкин

Подписано к печати __. __. 2017 г.

Формат 60 × 90 1/16. Бумага офсетная № 1.

Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № __ (2017).

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