

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный  
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД  
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ  
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**«Измерение статистических характеристик поверхностного волнения радиолокационными  
и акустическими системами»**

**Аспирант: Рябкова Мария Сергеевна**

---

*(подпись аспиранта)*

**Научный руководитель: Караев Владимир  
Юрьевич, к.ф.-м.н. старший научный сотрудник  
ИПФ РАН**

---

*(подпись научного руководителя)*

**Направление подготовки:**

03.06.01 Физика и астрономия

**Направленность (профиль) подготовки:**

01.04.03 Радиофизика

**Форма обучения:** очная

Нижний Новгород  
2020

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Для изучения механизмов обратного рассеяния электромагнитного излучения СВЧ-диапазона морской поверхностью при малых углах падения разрабатываются теоретические модели, применяется численное моделирование и выполняются измерения доплеровского спектра отраженного сигнала, например, [1-5]. Эти исследования стимулируются активным развитием дистанционных методов зондирования Земли.

Дистанционное зондирование открыло возможности оперативного получения глобальной информации о состоянии приповерхностного слоя Мирового океана и в этом направлении достигнуты значительные успехи. Как показывают последние реализованные и перспективные проекты [6, 7], связанные с орбитальными радиолокаторами, особое внимание начинает уделяться измерению спектральных и энергетических характеристик отраженного радиолокационного сигнала при малых углах падения.

Доплеровский спектр (ДС) излучения, отраженного движущейся морской поверхностью, является важным инструментом для дистанционного исследования волнения, и содержит больше информации о состоянии поверхности, чем сечение обратного рассеяния, например, доплеровский спектр содержит информацию о направлении движения рассеивателя относительно направления зондирования. Информация о смещении ДС при средних углах падения используется для восстановления поля приводного ветра [8] и скорости поверхностных течений [9].

Интерес к измерениям ДС при малых углах падения возрос в связи с планируемым запуском проекта SKIM (Sea surface Kinematics Multiscale) [6]. В SKIM используется коническое сканирование лучами при углах падения 6 и 12 градусов, радиолокатор работает в Ka-диапазоне. Результаты экспериментального исследования ДС при средних углах падения приведены, например, в работах [10-14]. В данных экспериментах наименьший угол падения составлял 20 градусов. До недавнего времени, несмотря на довольно большое количество работ посвященных численному моделированию ДС [2, 4, 15], не было натурных измерений ДС при малых (0-20 градусов) углах падения. Первые эксперименты по измерению ДС при углах падения от 0 до 20 градусов были проведены автором работы с коллегами на океанографической платформе МГИ РАН вблизи поселка Кацевели. Результаты этих экспериментов приведены в статьях [А2, А3]. Позже другой научной группой были проведены измерения доплеровского центроида при малых углах падения [16].

Область малых углов падения интересна тем, что ширина и смещение ДС зависят в явном виде от вторых моментов спектра волнения, как было показано в работе [1]. Это можно использовать для определения параметров волнения по ДС. Для интерпретации измерений ДС реальными антенными системами необходимо учитывать диаграмму направленности антенны. В работе [17] получены формулы для ширины и смещения доплеровского спектра с учетом ширины диаграммы направленности антенны на основе работы [1]. Это позволяет применять формулы для реальных антенн, в том числе и с широкой диаграммой направленности.

Для проверки разработанных теоретических моделей ДС необходимы экспериментальные измерения. Важным является вопрос о границах применимости приближения «квазизеркального» рассеяния, о выборе параметров доплеровского спектра отраженного сигнала, которые чувствительны к смене механизмов обратного рассеяния. Прикладной интерес носит разработка алгоритмов восстановления высоты волн и направления волнения по данным дистанционного зондирования.

Измерение сечения обратного рассеяния при малых углах падения выполняют орбитальные радиолокаторы СВЧ-диапазона, установленные на спутниках GMP и CFOSAT.

Анализ данных дождевых радиолокаторов спутников TRMM и GPM показал, что при углах падения меньше 12 градусов метод Кирхгофа, в рамках двухмасштабной модели морской поверхности, хорошо описывает зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения, например, [18, 19]. Разработанные алгоритмы позволяют определить дисперсию уклонов крупномасштабного, по сравнению с длиной электромагнитной волны, волнения, например, [18-21]. Однако при зондировании водной поверхности из космоса для получения зависимости сечения рассеяния от угла падения используются радиолокаторы с узкой диаграммой направленности антенны. При осуществлении зондирования акустическими методами с расположением прибора под водой использование движущихся частей нежелательно и часто невозможно, поэтому сканирование под разными углами падения предлагается реализовать за счет диаграммы направленности антенны.

В настоящее время задача измерения и мониторинга глобального поля морских течений становится актуальной и привлекает внимание ученых во всем мире. Разработан целый ряд проектов космических радаров, которые могут быть использованы для измерения течений [6, 22, 23]. Для измерения скорости течения предлагается использовать спектральные характеристики отраженного радиолокационного сигнала. Доплеровский спектр содержит информацию о характеристиках поверхности, связанной с ее движением, и необходимо научиться ее извлекать.

Наиболее разработанной является концепция измерения течения при средних углах падения, когда доминирующим является резонансный механизм обратного рассеяния. В качестве примера можно привести орбитальные радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), которые измеряют проекцию скорости течения на направление зондирования. Алгоритмы

обработки тестировались, в том числе и на реках, и подтвердили свою работоспособность. При восстановлении скорости течения на реке удастся определить полную скорость течения, т.к. направление течения задается руслом реки [24, 25].

Плюсом измерений при средних углах падения является то, что отражение происходит на резонансной ряби, которая движется в поле течения. Возможные ошибки связаны с тем, что существуют модуляция мощности отраженного сигнала уклонами крупномасштабного, по сравнению с длиной электромагнитной волны, волнения и гидродинамическая модуляция за счет неоднородного распределения ряби по профилю волны.

При малых углах падения рассеяние происходит участках волнового профиля крупномасштабного волнения, которые ориентированы перпендикулярно падающему излучению. На течении происходит трансформация спектра волнения, что приводит к изменению статистических характеристик рассеивающей поверхности и влияет на спектральные характеристики отраженного радиолокационного сигнала.

В проекте SKIM (Sea surface KInematics Multiscale monitoring) [6] предлагается измерять течения при малых углах падения. Однако экспериментальные подтверждения эффективности такого подхода в настоящее время отсутствуют.

Проведение измерений в морских условиях является достаточно сложной технической задачей, поэтому для оценки потенциала области малых углов падения для измерения скорости течения был проведен цикл измерений в речных условиях (август – октябрь 2019). В речных условиях направление течения и его скорость могут быть легко измерены.

Для полноценного исследования необходимо выполнить сравнение экспериментальных данных с моделью доплеровского спектра. Для получения количественных оценок необходимо для волнения, сформировавшегося на реке, вычислить статистические моменты второго порядка, которые используются в модели доплеровского спектра отраженного сигнала.

Для моделирования морской поверхности при оценке перспективности новых алгоритмов обработки радиолокационных данных, схем измерения и новых радиолокаторов широко применяются модели спектров волнения.

Первые достоверные спектры волнения были получены в середине 1960-ых [26, 27]. Появление моделей спектров морского волнения связано с развитием вычислительной техники, поскольку появилась возможность обрабатывать большие массивы экспериментальных данных.

К сожалению, спектры волнения, разработанные океанологами, не в полной мере соответствуют требованиям, предъявляемым специалистами по дистанционному зондированию. Спектры, применяемые для решения задач радиолокационного зондирования, должны описывать широкий диапазон длин волн: от нескольких сотен метров до нескольких миллиметров, т.к. на отражение электромагнитных волн влияют как короткие, так и длинные волны. До настоящего времени не проведено натурных экспериментов, в которых был бы

одновременно измерен весь диапазон длин волн. Соответственно, не существует общепризнанной модели спектра волнения, охватывающей весь интервала длин волн.

Прежде всего, потребность в такой модели спектра волнения испытывают ученые, занимающимися дистанционным зондированием, поэтому они «возглавили» процесс разработки спектра волнения, охватывающего весь диапазон длин волн, и предложили свои модели спектров.

В попытке объединить существующие натурные и лабораторные измерения спектров в различных диапазонах длин волн, разные исследователи создали множество моделей спектров волнения, каждый из которых «заточен» под определенную задачу [28-38].

Выбор модели спектра, используемой при моделировании, например, доплеровского спектра отраженного сигнала определяется как лучшим соответствием имеющимся экспериментальным данным, так и удобством использования модели спектра для конкретной задачи.

## **Цель работы**

Целью данной работы является исследование проявления процессов, происходящих на водной поверхности, в отраженном радиолокационном и акустическом сигналах и разработке алгоритмов восстановления параметров волнения. Достижение этой цели потребовало решения следующих задач:

- установление экспериментальных зависимостей параметров доплеровского спектра отраженного сигнала от азимутального угла и угла падения в морских условиях и на реке для случая вблизи надирного зондирования;
- построение модифицированной модели спектра волнения за счет улучшения описания коротковолновой части волнения;
- развитие методов решения обратной задачи – определения параметров поверхностного волнения по отраженному акустическому импульсу и доплеровскому спектру отраженного сигнала;
- экспериментальная проверка разработанных алгоритмов восстановления параметров волнения по доплеровскому спектру и акустическому импульсу отраженного сигнала;
- построение модели спектра волнения, сформировавшегося в условиях стационарного речного течения;
- исследование проявления стационарного течения в доплеровском спектре в численном моделировании и эксперименте;

## **Научная новизна научно-квалификационной работы**

1. Проведены измерения доплеровского спектра при углах падения 0-19 для разных азимутальных углов в морских условиях и на реке. Впервые для описания доплеровского спектра использовались коэффициенты асимметрии и эксцесса. Построены зависимости ширины и смещения доплеровского спектра, коэффициентов эксцесса и асимметрии от угла падения и азимутального угла. Предложены количественные критерии для определения доминирующего механизма обратного рассеяния.

2. Разработан алгоритм восстановления параметров волнения, который позволяет использовать единичное измерение доплеровского спектра (при одном угле падения и направлении зондирования). Алгоритм позволяет дополнительно восстанавливать параметры, которые непосредственно не входят в теоретическую модель доплеровского спектра: высоту значительного волнения, период волн.

3. Предложен метод вычисления спектра ветрового волнения на стационарном (речном) течении и получены оценки изменения параметров волнения в зависимости от угла между направлением течения и скоростью ветра (направления распространения волнения). Модель спектра волнения, учитывающая течение, использовалась для вычисления доплеровского спектра отраженного радиолокационного сигнала, и сравнение с экспериментом подтвердило эффективность предложенного метода.

4. В разработанной модели спектра волнения было улучшено описание коротковолновой части спектра волнения. Сравнение с известными экспериментальными данными подтвердило, что новая модель спектра волнения лишена ряда недостатков, присущим ряду популярных моделей спектра волнения, и может применяться для моделирования волнения в задачах дистанционного зондирования. Построены зависимости граничного волнового числа для наиболее распространенных длин волн радиолокаторов, используемых в дистанционном зондировании морской поверхности.

### **Научная и практическая значимость работы**

В работе представлен важный экспериментальный результат – измерение доплеровского спектра отраженного сигнала при малых углах падения. Установлены зависимости от угла падения (в пределах 0-19 градусов) и азимутального угла между направлением зондирования не только ширины и смещения доплеровского спектра, но и асимметрии и эксцесса, характеризующих изменение формы доплеровского спектра. Установлено, что асимметрия и эксцесс являются чувствительными к смене механизма рассеяния и могут применяться для определения границы применимости модели доплеровского спектра. Практическую значимость представляют разработанные алгоритмы восстановления параметров волнения по ширине и смещению доплеровского спектра. Полученные в работе методы измерения параметров рассеивающей поверхности могут быть использованы для расширения числа измеряемых

параметров морской поверхности в перспективных системах дистанционного зондирования. Это могут быть подводные, наземные и космические средства.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Проведены измерения доплеровского спектра отраженного электромагнитного излучения при углах падения от 0 до 19 градусов в морских условиях и на реке. Показано, что модель доплеровского спектра отраженного сигнала, построенная в приближении метода Кирхгофа, корректно описывает экспериментальные данные и позволяет проводить количественные оценки ширины и смещения доплеровского спектра. Интервал углов падения, где применима модель доплеровского спектра, зависит от интенсивности волнения. Асимметрия и эксцесс доплеровского спектра чувствительны к смене механизма обратного рассеяния и позволяют определить границы интервала, где доминирующим является "квазизеркальный" механизм обратного рассеяния.

2. Разработан подход к описанию развития ветрового волнения на стационарном течении (на реке). Получены зависимости спектра волнения от угла между направлением ветра и направлением течения в движущейся (связанной с течением) и неподвижной системах координат. Построены зависимости ширины и смещения доплеровского спектра от азимутального угла и направления зондирования, получены оценки влияния скорости и направления течения на доплеровский спектр.

3. Разработан и протестирован на экспериментальных данных оригинальный метод определения статистических параметров и направления волнения по ширине и смещению доплеровского спектра отраженного излучения. Новый подход использует понятие "радиолокационной" плоскости и позволяет определить эффективную скорость приводного ветра и длину ветрового разгона.

4. Разработан новый метод определения дисперсии уклонов крупномасштабного, по сравнению с длиной волны падающего излучения, волнения по форме отраженного взволнованной водной поверхностью акустического (радиолокационного) импульса.

5. Разработана новая модель спектра волнения, позволяющая моделировать развивающееся волнение и вычислять дисперсию уклонов, дисперсию орбитальных скоростей и другие статистические моменты второго порядка для заданной длины волны радиолокатора. В рамках двухмасштабной модели морской поверхности определены граничные волновые числа для электромагнитных волн, применяющихся при дистанционном зондировании морской поверхности (от 8 мм до 23 см).

### **Достоверность результатов**

Все полученные результаты обладают высокой степенью достоверности и являются обоснованными. Подтверждением этого служат результаты качественного и количественного сравнения данных, полученных в натуральных экспериментах дистанционными методами, с данными контактных измерений, данными численного моделирования и аналитических расчетов. Физическая трактовка полученных результатов находится в согласии с общепризнанными представлениями о рассеянии волн на статистически шероховатых поверхностях. Основные положения научно-квалификационной работы опубликованы в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах, докладывались на международных и всероссийских конференциях и неоднократно обсуждались на семинарах в ИПФ РАН.

### **Апробация результатов работы и публикации**

Работа подготовлена в Институте прикладной физики РАН. Основные результаты и положения работы были доложены на:

- 1) Четырнадцатая Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 14-17 ноября 2016, Москва, ИКИ РАН;
- 2) XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), 19-26 августа 2017, Монреаль, Канада;
- 3) Пятнадцатая Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 13-17 ноября 2017, Москва, ИКИ РАН;
- 4) 28 научная школа «Нелинейные волны – 2018», 26 февраля – 4 марта 2018, Нижний Новгород;
- 5) XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки), Нижний Новгород, 22-23 мая 2018;
- 6) 11th Coastal Altimetry Workshop, 12-15 июня 2018, ESA-ESRIN, Фраскати, Италия;
- 7) IGARSS 2018, 22-27.07.2018, Валенсия, Испания;
- 8) Шестнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 12-16 ноября 2018, Москва;
- 9) Конференция «Комплексные исследования мирового океана», 22-26 апреля 2019, Севастополь;
- 10) XXIV Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки), 21-24 мая 2019, Нижний Новгород;
- 11) Конференция OCEANS Marseilles 2019, 17-20 июня 2019, Марсель, Франция;
- 12) Geoscience and Remote Sensing (IGARSS), IEEE International Symposium, Йокогама, Япония, 28 июля – 2 августа 2019 года;
- 13) Семнадцатая Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 11-15 ноября 2019, Москва, ИКИ;



14) Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», 16-20 марта 2020, Таруса;

15) на семинарах ИПФ РАН.

Автор удостоился ряда наград за проводимые исследования:

1. Грант для участия в International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2018 за работу “A modified wave spectrum for modeling in remote sensing problems”, 2018 г.

2. Сертификат, подтверждающий, что статья вошла в 10% наиболее часто скачиваемых публикаций 2018-2019 годов от Journal of Geophysical Research: Oceans (издается American Geophysical Union) за статью Ryabkova, M., Karaev, V., Guo, J., & Titchenko, Yu. (2019). A review of wave spectrum models as applied to the problem of radar probing of the sea surface. Journal of Geophysical Research: Oceans, 124. <https://doi.org/10.1029/2018JC014804>

3. Диплом лауреата стипендии правительства Нижегородской области им. Г. А. Разуваева, 2018.

4. Диплом лауреата стипендии правительства Нижегородской области им. Г. А. Разуваева, 2019.

Результаты работы приведены в 5 статьях, 3 из которых опубликованы в научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных Президиумом Высшей аттестационной комиссии [A1-A3], и 2 статьи находятся на рецензировании [A4, A4], в 12 трудах конференций [A6-A17] и в 7 тезисах конференций [A18-A25].

### **Личный вклад автора**

Все результаты работы были получены непосредственно автором, включая построение модифицированной модели спектра волнения, разработку методов восстановления параметров волнения, проведение численного моделирования и натурных экспериментов на реке Ока и Черном море.

### **Структура и содержание работы**

Работа состоит из введения, 3-х глав, заключения, приложений, списка литературы и списка публикаций автора. Общий объем научно-квалификационной работы составляет 133 страниц, включая 65 иллюстраций, 5 таблиц и список цитируемой литературы из 113 наименований. Список публикаций автора по теме работы содержит 25 наименований.

### **Краткое содержание работы**

Во Введении обоснована актуальность выбранной темы работы, сформулированы цели и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, указана научная

новизна, обоснована научная и практическая значимость работы, определен личный вклад автора.

В Главе 1 описана используемая для моделирования параметров волнения модель спектра волнения. В разделе 1.2 излагается краткая история развития моделей спектров ветрового волнения, которые применялись и применяются для моделирования в задачах дистанционного зондирования. Основное внимание уделено экспериментальным и теоретическим работам, на которые опирались авторы нескольких наиболее популярных моделей спектра, выбранных для сравнительного анализа. Раздел 1.3 посвящен описанию рассматриваемых моделей спектра. Для анализа было выбрано несколько относительно новых моделей спектра, которые не только широко применяются исследователями для моделирования, но и представляют разные подходы к конструированию модели спектра волнения: модель спектра, разработанная Т. Elfouhaily с соавторами [31], Р.А. Hwang с соавторами [33], и В.Н. Кудрявцева с соавторами (последняя версия спектра представлена в Приложении А в статье [37]), и модель спектра, разработанная В.Ю. Караевым с соавторами [38]. В результате была разработана новая модель спектра волнения, которая лишена ряда недостатков, присущих другим моделям спектра. Сравнение теоретических оценок, полученных по новому спектру волнения, с экспериментальными данными показало их достаточно хорошее соответствие. В подразделе 1.3.1 рассматривается модель спектра В.Ю. Караева. Спектр описывается как кусочно-заданная на пяти частотных интервалах функция, аппроксимации основаны на экспериментальных данных, спектр зависит от скорости ветра и безразмерного разгона. В подразделе 1.3.2 рассматривается модель спектра Т. Elfouhaily. Спектр описывается как сумма двух функций: спектра высоких частот и спектра низких частот, экспоненциальный множитель ограничивает энергию волн с  $k > 10k_p$ . Спектр основан на аппроксимации экспериментальных данных, зависит от скорости ветра и обратного возраста волнения. В подразделе 1.3.3 рассматривается модель спектра В.Н. Кудрявцева. Спектр описывается в виде сумму двух функций: спектра высоких частот и спектра низких частот, экспоненциальный множитель ограничивает энергию волн с  $k > 10k_p$ . Спектр высоких частот представляется как численное решение уравнения баланса энергии, спектр низких частот – аппроксимация экспериментальных данных, спектр зависит от скорости ветра и обратного возраста волнения. В подразделе 1.3.4 рассматривается модель спектра Р.А. Hwang. Аппроксимация спектра имеет единый общий вид для всех частот, однако значения параметров аппроксимации зависят от частоты и скорости ветра. В разделе 1.4 приведено сравнение моделей по ряду критериев, которые автор считает существенными для спектра, используемого для моделирования в задачах дистанционного зондирования. В подразделе 1.4.1 рассмотрены следующие критерии: возможность учесть при моделировании зависимость от ветрового разгона, соответствие модели спектра экспериментальным измерениям доплеровского спектра и дисперсии уклонов. Показано, что данным критериям удовлетворяют только два спектра: спектр

В.Ю. Караева и спектр В.Н. Кудрявцева. В подразделе 1.4.2 проведено сравнение вида зависимости сечения обратного рассеяния геофизическим модельным функциям для различных диапазонов длин волн падающего электромагнитного излучения при средних углах падения ( $20^\circ$  -  $60^\circ$ ). Показано, что ни одна из рассматриваемых моделей спектров не соответствует всем выдвинутым требованиям. Предложено разработать новую модель спектра. Новая модифицированная модель спектра волнения представлена в разделе 1.5. В подразделе 1.5.1 представлено описание модифицированной модели спектра волнения, которая основана на спектре В.Ю. Караева, коротковолновая часть спектра изменена на основе экспериментальных измерений из работы [37]. Спектр определен для скоростей ветра от 3 до 20 м/с и для значений безразмерного разгона от 1430 до 20170. В подразделе 1.5.2 проведено сравнение рассчитанных с использованием модели спектра дисперсии уклонов и сечения обратного рассеяния геофизическим модельным функциям для различных диапазонов длин волн падающего электромагнитного излучения при средних углах падения ( $20^\circ$  -  $60^\circ$ ). Для новой спектральной модели определены граничные волновые числа для различных диапазонов длин волн падающего электромагнитного излучения в рамках двухмасштабной модели поверхности, описанные в подразделе 1.5.3. Полный спектр (включая зыбь) описан в разделе 1.6. Используемая в главе терминология представлена и объяснена в Приложении 1.

В Главе 2 приведены экспериментальные измерения доплеровского спектра отраженного сигнала и предложены алгоритмы восстановления параметров волнения. В разделе 2.2 приведены определения параметров волнения доплеровского спектра: сечения обратного рассеяния, смещения, ширины, асимметрии и эксцесса доплеровского спектра. В разделе 2.3 приведены результаты измерения доплеровского спектра отраженного электромагнитного сигнала при малых углах падения в морских условиях, проведенные на океанографической платформе Черном море в октябре 2016 года. Произведено сравнение с расчетами доплеровского спектра по модели, описанной в работе [17] и приведенной в Приложении 2. При "больших" углах падения наблюдается завышение модельных оценок ширины и смещения доплеровского спектра по сравнению с экспериментом. Наблюдаемое уменьшение смещения доплеровского спектра при увеличении угла падения, а также искажение формы доплеровского спектра объясняется уменьшением «вклада» квазизеркальной компоненты в суммарный отраженный сигнал по сравнению с резонансным рассеянием. С увеличением угла падения увеличиваются коэффициенты асимметрии и эксцесса. При углах падения больше  $8-12$  градусов меняется вид зависимости коэффициентов асимметрии и эксцесса от угла падения, также при углах падения больше  $8-12$  градусов экспериментально измеренные зависимости смещения, ширины ДС и сечения рассеяния от угла падения также начинают расходиться с данными моделирования. По мере уменьшения влияния вклада «квазизеркальной» компоненты, доплеровский спектр становится несимметричным относительно максимума и более узким по сравнению с

нормальным распределением. Таким образом, введение в рассмотрение дополнительных параметров позволяет обнаружить "смену" доминирующего механизма обратного рассеяния. В [разделе 2.4](#) описаны методы восстановления параметров волнения. В случае чисто ветрового волнения спектр волнения зависит от трех параметров: скорости ветра, ветрового разгона и направления распространения волнения. В [подразделе 2.4.1](#) предложен метод определения направления волнения по азимутальной зависимости смещения доплеровского спектра отраженного сигнала. Смещение доплеровского спектра сильно зависит от азимутального угла между направлением зондирования и направлением волнения, при зондировании перпендикулярно волнению смещение доплеровского спектра становится равным нулю. Таким образом, зная азимутальную зависимость смещения ДС от угла падения, можно определить направление, перпендикулярное направлению распространения волнения. Направление распространения волнения можно будет отличаться от полученного на  $90^{\circ}$  и соответствует отрицательным значениям смещения ДС. В [подразделе 2.4.2](#) предложен метод восстановления статистических характеристик волнения по ширине и смещению доплеровского спектра отраженного сигнала. В случае чисто ветрового волнения, каждая точка на плоскости ширина-смещение (радиолокационная плоскость) соответствует определенному волновому состоянию, т.е. паре скорость ветра-безразмерный ветровой разгон. Используя модель спектра волнения можно рассчитать параметры волнения, например, высоту волн, средний период, дисперсию вертикальной составляющей орбитальной скорости. В [подразделе 2.5](#) приведено сравнение параметров волнения восстановленных по ширине и смещению доплеровского спектра с измерениями струнного волнографа. Показано, что относительная ошибка между высотой волн, средним периодом, дисперсией орбитальных скоростей, усредненных за 20 минут, и напрямую измеренными значениями менее 0.3 для большинства измерений. В [разделе 2.6](#) предложена концепция восстановления дисперсии уклонов по измерениям акустического импульса с широкой диаграммой направленности. Показано, что при использовании ножевой диаграммы направленности приемной антенны дисперсия уклонов вдоль направления зондирования получена из зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения аналитически.

[Глава 3](#) посвящена формированию спектра волнения и анализу свойств доплеровского спектра отраженного сигнала на постоянном речном течении. В [разделе 3.2](#) проведено теоретическое исследование развития волнения на стационарном речном течении. Предлагается перейти в систему отсчета, связанную с течением, и рассматривать вклад течения в формирование спектра волнения только как изменение эффективной скорости ветра. В [подразделе 3.2.1](#) представлен вид спектра в движущейся системе отсчета, связанной с течением. Эффективная скорость ветра максимальна при встречном направлении скорости ветра (спектр сильнее сдвинут в область малых волновых чисел) и минимальна при попутном направлении. В результате при одинаковой скорости ветра высота значительного падает при уменьшении

азимутального угла между направлением зондирования и направлением течения. В [подразделе 3.2.2](#) произведен переход в неподвижную систему отсчета. С увеличением скорости попутного течения происходит сдвиг в сторону более высоких частот. Трансформация спектра волнения выглядит необычно для случая встречного течения. В этом случае существует точка, когда скорость течения равна фазовой скорости поверхностной волны и частота становится равной нулю, количество таких точек зависит от скорости течения. В [разделе 3.3](#) рассмотрено формирование доплеровского спектра отраженного сигнала на стационарном речном течении в рамках теоретической модели. В [подразделе 3.3.1](#) рассмотрено изменение параметров волнения на течении. Дисперсия уклонов зависит от скорости ветра, поэтому принимает максимальное значение, когда эффективная скорость ветра максимальна, и не будет меняться при переходе из движущейся в неподвижную систему отсчета. В движущейся системе координат дисперсия орбитальных скоростей увеличивается с ростом скорости ветра, т.е. когда ветер и течение имеют противоположные направления дисперсия орбитальных скоростей максимальна. Однако в неподвижной системе координат происходит изменение частоты и интеграл по спектру становится меньше. И наоборот, дисперсия орбитальной скорости увеличивается, когда направление ветра совпадает с направлением течения, т.е. когда эффективная скорость ветра становится меньше и волнение менее интенсивно. Происходит уменьшение вертикальной компоненты скорости при неизменной дисперсии уклонов, а значит коэффициент корреляции между уклонами и орбитальными скоростями уменьшается при противоположных направлениях течения и ветра. В [подразделе 3.3.2](#) рассмотрено влияние угла между направлением ветра и направлением течения на доплеровский спектр. Из модельных оценок следует, что при направлении распространения волнения под углом  $90^\circ$  градусов при отсутствии течения смещение доплеровского спектра равно нулю. При наличии течения происходит "сдвиг" положения нулевого смещения доплеровского спектра и он тем больше, чем выше скорость течения. В результате, расстояние между "нулями" меньше  $180^\circ$ , т.е. азимутальная зависимость становится несимметричной. Дисперсия вертикальной компоненты орбитальной скорости при нулевом азимутальном угле минимальна. Однако вследствие того, что ширина доплеровского спектра увеличивается с уменьшением коэффициента корреляции, этот эффект оказывается сильнее и приводит к росту ширины доплеровского спектра. В [подразделе 3.3.3](#) рассмотрена азимутальная зависимость доплеровского спектра. В качестве дополнительного критерия для определения наличия течения может использоваться азимутальная зависимость сечения обратного рассеяния. Дело в том, что сечение обратного рассеяния зависит от дисперсии уклонов крупномасштабного волнения (направления распространения волнения), а на смещение доплеровского спектра дополнительное влияние оказывает скорость течения. Несовпадение положения максимумов/минимумов говорит о наличии течения. В [разделе 3.4](#) приведены результаты измерений доплеровского спектра отраженного сигнала при малых углах падения в

присутствии постоянного течения. Измерения проводились под несколькими углами падения ( $7,4^\circ$ ,  $12,4^\circ$ ,  $17,4^\circ$ ,  $22,4^\circ$ ,  $27,4^\circ$ ), а азимутальный угол (направление зондирования) изменялся в интервале  $-75^\circ$  до  $75^\circ$  или  $-70^\circ$  до  $70^\circ$ . В подразделе 3.4.1 рассмотрена зависимость параметров доплеровского спектра от угла падения, как и в случае морского волнения с увеличением угла падения происходит рост смещения доплеровского спектра. Измеренный на реке доплеровский спектр остается достаточно симметричным почти во всем интервале углов падения, но является более узким по сравнению с гауссовым спектром. Коэффициент эксцесса принимает большие значения при малых углах падения, что отличает его от доплеровского спектра, измеренного на морской океанографической платформе (Черное море). В подразделе 3.4.2 рассмотрены азимутальные зависимости параметров доплеровского спектра. Ширина доплеровского спектра  $\Delta F_{42}$ , вычисленная через 4 и 2 статистические моменты оказалась значительно стабильнее, чем  $\Delta F$ , и для трех (два сеанса для  $12,4^\circ$  и 1 сеанс для  $7,4^\circ$ ) измерений практически не зависела от направления зондирования. Использование более распространенного определения ширины доплеровского спектра  $\Delta F$  может привести к неправильной оценке параметров волнения, если предположить, что наблюдаемое уменьшение ширины доплеровского спектра связано с уменьшением интенсивности волнения, хотя реальной причиной является изменение коэффициента эксцесса. В подразделе 3.4.3 произведено сравнение модельных оценок параметров доплеровского спектра и экспериментальных измерений. Из сравнения видно, что увеличение смещения доплеровского спектра отраженного радиолокационного сигнала на течении происходит не за счет появления "новых" частот в спектре (более быстрых рассеивателей), а за счет увеличения мощности существующих рассеивателей.

В Заключении сформулированы основные результаты работы.

## **Благодарности**

Автор выражает благодарность своему научному руководителю В.Ю. Караеву за постановку задачи, чуткое руководство, плодотворное обсуждение, а также за бесценный вклад в обучение автора основам научной деятельности. Особую благодарность автор выражает Э.М. Зуйковой, Ю.А. Титченко, М.А. Панфиловой и Е.М. Мешкову за существенный вклад в экспериментальную часть работы и обучение автора. Автор благодарит М.В. Юровскую за предоставленные экспериментальные данные, В.Н. Кудрявцева за предоставленный код программы для вычисления спектра и плодотворные обсуждения. Автор благодарит И.В. Ошарина за помощь в подготовке иллюстративного материала и ценные замечания.

## **Основные результаты**

1. Были сформулированы требования к модели спектра морского волнения и проведен анализ соответствия наиболее популярных моделей спектра волнения этим требованиям.

Оказалось, что существующие модели не соответствуют этим требованиям в полном объеме и не способны обеспечить реалистичное моделирование влияние волнового климата на точность алгоритмов определение скорости приводного ветра. Для решения возникшей проблемы была проведена модификация существующей модели спектра волнения [38] на основе новых данных о коротковолновой части спектра волнения, полученных в ходе эксперимента на морской платформе, установленной в Черном море [37]. В результате проведенного исследования была построена модифицированная модель спектра волнения, которая отвечает всем требованиям, которые были предъявлены для выполнения численного моделирования скаттерометрических измерений с целью получения оценки влияния параметров волнения и степени его развития на точность алгоритма восстановления скорости проводного ветра. Для удобства использования модифицированной модели спектра волнения были вычислены зависимости граничного волнового числа для Ку-, Х-, С-, L- диапазонов, которое, в соответствии с двухмасштабной моделью рассеивающей поверхности, делит спектр волнения на крупномасштабную и мелкомасштабную составляющие.

2. Проведена серия экспериментов по изучению обратного рассеяния при малых углах падения. Измерения выполнялись доплеровским радиолокатором (длина волны 0083 м) с шагом по углу падения в 1 градус в интервале углов падения от  $0^0$  до  $18,7^0$ . Спектр волнения измерялся струнным волнографом, скорость ветра – анемометром. Для описания доплеровского спектра использовались традиционные параметры: ширина и смещение. Эксперимент показал, что форма доплеровского спектра зависит от угла падения, поэтому для более точного описания доплеровского спектра необходимо использовать коэффициенты асимметрии и эксцесса. Коэффициенты позволяют «количественно» оценить переход от квазизеркального к брэгговскому механизму обратного рассеяния, отслеживая изменение формы доплеровского спектра.

3. Сечение обратного рассеяния является наиболее «грубым» параметром и наблюдается хорошее совпадение модели и эксперимента до угла падения  $14^0$ . Это объясняется тем, что падение мощности квазизеркальной компоненты компенсируется увеличением вклада брэгговской компоненты в суммарный сигнал. Смещение и ширина доплеровского спектра демонстрируют расхождение теории и эксперимента начиная с угла падения примерно в  $8^0$ . Это происходит, когда коэффициенты асимметрии и эксцесса становятся больше 0.2-0,3. Форма доплеровского спектра чувствительна к изменению механизма обратного рассеяния и это можно использовать в алгоритмах обработки.

4. Проведенное исследование показало, что наиболее точным методом определения направления распространения волнения является анализ азимутальной зависимости. Смещение доплеровского спектра зависит от азимутального угла между направлением зондирования и направлением волнения и при зондировании перпендикулярно волнению смещение

доплеровского спектра становится равным нулю, а производная становится максимальной. Это позволяет наиболее точно определить направление, перпендикулярное направлению распространения волнения. Направление распространения волнения будет отличаться от полученного на  $90^0$  и соответствует отрицательным значениям смещения ДС.

5. Предложен метод восстановления статистических параметров волнения по ширине и смещению доплеровского спектра отраженного сигнала. В случае чисто ветрового волнения, каждая точка на плоскости ширина-смещение (радиолокационная плоскость) соответствует определенному волновому состоянию, т.е. паре скорость ветра-безразмерный ветровой разгон. Разработанный алгоритм позволяет определить скорость ветра и длину ветрового разгона. Переходя к модели спектра волнения можно вычислить основные параметры волнения, например, высоту волн, средний период, дисперсию вертикальной составляющей орбитальной скорости.

6. Предложена концепция измерения полной дисперсии уклонов гидролокатором с широкой диаграммой направленности антенны в импульсном режиме. Также показано, что при использовании ножевой диаграммы направленности приемной антенны дисперсия уклонов вдоль направления ориентации антенны может быть вычислена по аналитической формуле.

7. Рассмотрены особенности формирования ветрового волнения на реке в условиях постоянной скорости течения. Получены зависимости спектра волнения от угла между направлением ветра и направлением течения в движущейся (связанной с течением) и неподвижных системах координат. Для задания спектра волнения, сформировавшегося в таких условиях, были введены понятия эффективной скорости ветра и эффективного направления ветра. Это позволило получить количественные оценки статистических моментов второго порядка, которые в дальнейшем использовались для вычисления доплеровского спектра.

8. Проведено моделирование доплеровского спектра для условий реки. Построены зависимости ширины и смещения доплеровского спектра от азимутального угла и направления зондирования, получены оценки влияния скорости течения на доплеровский спектр. Показано, что азимутальные зависимости сечения обратного рассеяния, ширины и смещения доплеровского спектра позволяют предложить несколько подходов (алгоритмов) к задаче определения скорости и направления течения.

9. Проведены первые эксперименты по измерению спектральных и энергетических характеристик отраженного радиолокационного сигнала при углах падения меньше  $30^0$  в условиях речного течения. Получены зависимости ширины и смещения доплеровского спектра от угла падения и азимутального угла (направления зондирования). Показано, что в отличие от морского волнения коэффициент эксцесса максимален при малых углах падения и уменьшается при увеличении угла падения. Это приводит к занижению смещения доплеровского спектра в модельных оценках по сравнению с экспериментом. Особенно чувствительным к величине



коэффициента эксцесса является ширина доплеровского спектра  $\Delta F$ . Минимизировать влияние формы отраженного доплеровского спектра позволяет другое определение ширины доплеровского спектра  $\Delta F_{42}$ . Сравнение с теорией и эксперимента подтвердило их близость.

### **Список публикаций по теме научно-квалификационной работы**

- A1. Ryabkova M. A review of wave spectrum models as applied to the problem of radar probing of the sea surface / Ryabkova M., Karaev V., Guo J., Titchenko Yu. // *Journal of Geophysical Research: Oceans* – 2019. – V. 124 - № 10 – P. 7104–7134.
- A2. Panfilova M. Retrieval of the Statistical Characteristics of Wind Waves From the Width and Shift of the Doppler Spectrum of the Backscattered Microwave Signal at Low Incidence Angles / Panfilova M., Ryabkova M., Karaev V., Skiba E. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* – 2020. – V. 58 - № 3 – P. 2225–2231.
- A3. Караев В.Ю. Доплеровский спектр радиолокационного сигнала, отражённого морской поверхностью при малых углах падения: эксперимент / Караев В.Ю., Панфилова М.А., Рябкова М.С., Титченко Ю.А., Мешков Е.М. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса* – 2020. – Т. 17 – №2 – С. 149–161.
- A4. Рябкова М.С. К вопросу о влиянии речного течения на доплеровский спектр отраженного радиолокационного сигнала при малых углах падения / Рябкова М.С., Караев В.Ю., Панфилова М.А., Титченко Ю.А., Мешков Е.М., Зуйкова Э.М. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, на рецензии
- A5. Рябкова М.С. Доплеровский спектр радиолокационного СВЧ-сигнала обратного рассеяния: эксперимент на реке / Рябкова М.С., Караев В.Ю., Панфилова М.А., Титченко Ю.А., Мешков Е.М., Зуйкова Э.М. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, в печати
- A6. Ryabkova M. A modified wave spectrum for modeling in remote sensing problems // 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – 2018. – 3266-3269p.
- A7. Ryabkova M. Experimental study of the microwave radar Doppler spectrum backscattered from the sea surface at low incidence angles // 2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS) – 2017. – 1-4p.
- A8. Panfilova M. Retrieving of significant wave height and period from the Doppler spectrum of backscattered microwave signal // 12th European Conference on Antennas and Propagation –2018. – 1-3p.
- A9. Panfilova M. Slope variance retrieval from the Doppler spectrum measured by Ka-band radar at near nadir incidence angles // OCEANS 2019 Marseilles – 2019. – 1-5p.
- A10. Ryabkova M. Simultaneous Doppler Spectra Measurements of the Backscattered Signal at Low Incidence Angles Using Microwave Radars and an Ultrasonic Underwater Wave Gauge // OCEANS

2019 Marseilles – 2019. – 1-4p.

A11. Titchenko Y. Peculiarities of the acoustic pulse formation reflected by the water surface: a numerical experiments and the results of long-term measurements using the "Kalmar" sonar // OCEANS 2019 Marseilles – 2019. – 1-7p.

A12. Karaev V. Application of a Doppler radar for measurements of current velocity at small incidence angles: the first experiments at the river, 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – 2020, принята к печати

A13. Karaev V. Doppler spectrum of microwave radar signal backscattered by sea surface at low incidence angles // 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – 2018. – 979-982p.

A14. Панфилова М.А. Алгоритм восстановления статистических характеристик ветрового волнения по измерениям доплеровского спектра отраженного сигнала при малых углах падения // XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки) – 2018. – 43-44с.

A15. Рябкова М.С. Подводный гидроакустический волнограф "Кальмар" на Черноморском полигоне ИО РАН "Геленджик" для долговременного всепогодного мониторинга состояния морской поверхности // IV Всероссийская научная конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» – 2019. 151-152с.

A16. Ryabkova M. Undewater Acoustic Wave Gauge Measurements of Sea Wave Parameters: Test Experiment and Modeling // 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – 2019. – 8113-8116p.

A17. Караев В.Ю. Определение статистических параметров ветрового волнения по измерениям доплеровского спектра отраженного радиолокационного сигнала с учетом диаграммы направленности антенны локатора // XVIII Научной школы «Нелинейные Волны – 2018» – 2018. – 157-159с.

A18. Рябкова М.С. Модифицированный спектр морского волнения для задач дистанционного зондирования // 14-ая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» – 2016 – 303с.

A19. Рябкова М.С. Спектры поверхностного волнения для задач дистанционного зондирования: обзор популярных моделей и обсуждение новой модели // 15-ая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» – 2017 – 286с.

A20. Панфилова М.А. Восстановление статистических характеристик ветрового волнения по ширине и смещению доплеровского спектра отраженного радиолокационного сигнала // 15-ая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» – 2017 – 282с.

- A21. Рябкова М.С. Подводный акустический волнограф "Кальмар" для долговременного мониторинга состояния морской поверхности: первые испытания и численное моделирование // 16-ая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» – 2018 – 313с.
- A22. Караев В.Ю. К вопросу об обратном рассеянии электромагнитных волн СВЧ-диапазона морской поверхностью при углах падения меньше 20 градусов // 17-ая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» – 2019 – 275с.
- A23. Рябкова М.С. Экспериментальное исследование доплеровского спектра сигнала, отраженного взволнованной водной поверхностью при малых углах падения в присутствии постоянного течения // 17-ая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» – 2019 – 326с.
- A24. Титченко Ю.А. Возможности определения параметров волнения на основе анализа формы отраженного акустического импульса // 17-ая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» – 2019 – 150с.
- A25. Рябкова М.С. Синхронное измерение поверхностных волн подводным акустическим волнографом и струнным волнографом в натурном эксперименте // 17-ая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» – 2019 – 325с.

### **Список цитируемой литературы**

1. Басс Ф.Г. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности / Ф.Г. Басс, И.М. Фукс. – Москва: Наука, 1972. – 424 с.
2. Toporkov J.V. Numerical simulations of scattering from time-varying, randomly rough surfaces / Toporkov J.V., Brown G.S. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing – 2000. – V. 38 – № 4 – P.1616–1625.
3. Nouguier F. Sea Surface Kinematics From Near-Nadir Radar Measurements / Nouguier F., Chapron B., Collard F., Mouche A., Rasle N., Arduin F., Wu X. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing – 2018. – V. 56 – № 10 – P. 6169-6179.
4. Fois F. An analytical model for the description of the full-polarimetric sea surface Doppler signature / Fois F., Hoogeboom P., le Chavalier F., Stoffelen A. // Journal of Geophysical Research: Oceans – 2015. – V. 120 – P. 988-1015.
5. Boisot O. Dynamical properties of sea surface microwave backscatter at low-incidence: Correlation time and Doppler shift / Boisot O., Amarouche L., Lalaurie J.-C., Guérin C.-A. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing – 2016. – V. 54 – № 12 – P. 7385–7395.
6. Arduin F. SKIM, a Candidate Satellite Mission Exploring Global Ocean Currents and Waves /

- Ardhuin F., Brandt P., Gaultier L., Donlon C., Battaglia A., Boy F. & the international SKIM team // *Frontiers in Marine Science* – 2019. – V. 6 – Art. 209.
7. Hauser D. SWIM: The First Spaceborne Wave Scatterometer / Hauser D., Tison C., Amiot T., Delaye L., Corcoral N., Castillan P. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* – 2017. – V. 55 – № 5 – P. 3000-3014.
8. Mouche A. On the use of Doppler shift for sea surface wind retrieval from SAR / Mouche A., Collard F., Chapron B., Dagestad K., Guitton G., Johannessen J. A., Kerbaol V., Hansen M. W. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* – 2012. – V. 50 – № 7 – P. 2901–2909.
9. Hansen M. W. Retrieval of sea surface range velocities from Envisat ASAR Doppler centroid measurements / Hansen M. W., Collard F., Dagestad K., Johannessen J.A., Fabry P., Chapron B. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* – 2011. – V. 49 – № 10 – P. 3582–3592.
10. Thompson D. R. A comparison of Ku-band Doppler measurements at 20° incidence with predictions from a time-dependent scattering model / Thompson D. R., Gotwols B. L., Keller W. C. // *Journal of Geophysical Research* – 1991. – V. 96 – P. 4947–4955.
11. Wright J. W. Doppler spectra in microwave scattering from wind waves / Wright J. W., Keller W. C. // *AIP Phys. Fluids*. – 1971. – V. 4 – P. 466–474.
12. Grebenjuk Y. M. On the Doppler Spectrum Width of the VHF radar signal backscattered by the sea surface at the middle and large incidence angles / Grebenjuk Y. M., Kanevsky M. B., Karaev V. Y. // *Izvestiya Akademii Nauk Fizika Atmosfery I Okeana* – 1994. – V. 30 – P. 59–62.
13. Poulter E. M. Microwave backscatter from the sea surface: Bragg scattering by short gravity waves / E. M. Poulter, M. J. Smith, and J. A. McGregor // *Journal of Geophysical Research* – 1994. – V. 99 – № C4 – P. 7929–7943.
14. Plant W. J. Evidence of Bragg scattering in microwave Doppler spectra of sea return / Plant W. J., Keller W. C. // *Journal of Geophysical Research* – 1990. – V. 95 – № C9 – P. 16299–16310.
15. Boisot O. Dynamical properties of sea surface microwave backscatter at low-incidence: Correlation time and Doppler shift / Boisot O., Amarouche L., Lalaurie J.-C., Guérin C.-A. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* – 2016. – V. 54 – № 12 – P. 7385–7395.
18. Yurovsky Y. Y. Sea surface ka-band Doppler measurements: Analysis and model development / Yurovsky Y. Y., Kudryavtsev V. N., Grodsky S. A., Chapron B. // *Remote Sensing* – 2019. – V. 11 – № 7 – P. 839.
19. Караев В.Ю. Доплеровский спектр радиолокационного сигнала, отражённого морской поверхностью при малых углах падения / Караев В.Ю., Титченко Ю.А., Мешков Е.М., Панфилова М.А., Рябкова М.С. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса* – 2019. – Т. 16 – № 6 – С. 221-234.
20. Freilich M.H. The relation between winds, surface roughness, and radar backscatter at low incidence angles from TRMM Precipitation Radar measurements / Freilich M.H., Vanhoff B.A. // *Journal of*

Atmospheric and Oceanic Technology – 2003. – Т. 20 – № 4 – С. 549-562.

21. Chu X. Relationships between Ku-band radar backscatter and integrated wind and waves parameters at low incidence angles / Chu X., He Y., Karaev V., Chen G. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing – 2012. – Vol. 50 – № 11 – P. 4599-4609.

22. Караев В. Восстановление дисперсии наклонов крупномасштабных волн по радиолокационным измерениям в СВЧ-диапазоне / Караев В., Панфилова М., Баландина Г., Чу К. // Исследование Земли из космоса – 2012. – № 4 – С. 62-77.

23. Panfilova M. Oil slick observation at low incidence angles in Ku-band / Panfilova M., Karaev V., Guo J. // Journal of Geophysical Research, Oceans – 2018. – V. 123 – P. 1924-1936.

24. Gommenginger C. SEASTAR: A Mission to Study Ocean Submesoscale Dynamics and Small-Scale Atmosphere-Ocean Processes in Coastal, Shelf and Polar Seas / Gommenginger C., Chapron B., Hogg A., Buckingham C., Fox-Kemper B., Eriksson L. & the international SEASTAR team // Frontiers in Marine Science – 2019. – V. 6. – Art. 457.

25. Rodriguez E. The Winds and Currents Mission Concept / Rodriguez E., Bourassa M., Chelton D., Farrar J.T., Long D // Frontiers in Marine Science – 2019. – V. 6. – Art. 438.

26. Romeiser R. Current measurements in rivers by spaceborne along-track InSAR / Romeiser R., Runge H., Suchandt S., Sprenger J., Weilbeer H., Sohrmann A., Stammer D. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing – 2007. – V. 45. – № 12 – P. 4019–4031.

27. Barale V. Oceanography from space / Barale V., Gower J., Alberotanza L. – London: Springer. 2010. – 374 p.

28. Kitaigorodskii S. A. Applications of the theory of similarity to the analysis of wind-generated wave motion as a stochastic process / Kitaigorodskii S. A. // Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seria Geofizicheskaya – 1962. – V.1 – P.105-117. English Edition, p.73-80.

29. Pierson Jr. W. J. Proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii / Pierson Jr., W. J., Moskowitz L. A. // Journal of Geophysical Research – 1964. – V. 69 – № 25 – P.5181-5190.

30. Apel J.R. An improved model of the ocean surface wave vector spectrum and its effects on radar backscatter / Apel J.R. // Journal of Geophysical Research – 1994. – V. 99 – № C8 – P.16269–16291.

31. Bringer A. Revisiting the Short-Wave Spectrum of the Sea Surface in the Light of the Weighted Curvature Approximation / Bringer A., Chapron B., Mouche A., Guérin C.-A. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing – 2014 – V. 52 – № 1 – P. 679-689.

32. Donelan M. A. Radar scattering and equilibrium ranges in wind-generated waves with application to scatterometry / Donelan M. A, Pierson Jr. W. J. // Journal of Geophysical Research – 1987. – V. 92 – C5 – P.4971-5029.

33. Elfouhaily T. A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves / Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D. // Journal of Geophysical Research: Oceans – 1997. – V.102 –

№ C7 – P.15781–15796.

34. Hasselmann K. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) / Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E., Carlson H., Cartwright D. E., Enke K., et al. // Deutsches Hydrographisches Zeitschr – 1973. – V. A8 –№ 12 – P.1-95.

35. Hwang P.A. Surface roughness and breaking wave properties retrieved from polarimetric microwave radar backscattering / Hwang P.A., Fois F. // Journal of Geophysical Research: Ocean – 2015. – V.120 –№ 5 – P. 3640-3657.

36. Kudryavtsev V. On radar imaging of current features: 1. Model and comparison with observations / Kudryavtsev V., Akimov D., Johannessen J., Chapron B. // Journal of Geophysical Research – 2005. – V.110 –№ C7.

37. Plant W. J. A stochastic, multiscale model of microwave backscatter from the ocean / Plant W. J. // Journal of Geophysical Research – 2002. – V.107 –№ C9. – P.3120.

38. Toba Y. Local balance in the air-sea boundary process / Toba Y. // Journal of the Oceanographic Society of Japan – 1973. – V.29 –№ 5. – P. 209-225.

39. Zakharov V.E., Kinetic equation and Kolmogorov spectra in weak- turbulent theory of wind waves / Zakharov V.E., Zaslavsky M.M. // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics – 1982. – V.18 –№ 9. – P. 970–980.

40. Yurovskaya M. V., Directional short wind wave spectra derived from the sea surface photography / Yurovskaya M. V., Dulov V. A., Chapron B., Kudryavtsev V. N. // Journal of Geophysical Research – 2013. – V.118 –№ 9. – P. 1-15.

41. Караев В.Ю., Модифицированный спектр волнения и дистанционное зондирование / Караев В.Ю., Баландина Г.Н. // Исслед. Земли из космоса – 2000. –№ 5 – P. 1-12.