

На правах рукописи



РУСАКОВ Никита Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ
МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ
В УСЛОВИЯХ ШТОРМОВОГО ВЕТРА**

1.3.4 – радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Научный руководитель: Троицкая Юлия Игоревна, доктор физико-математических наук, заведующий отделом ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: Кудрявцев Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией спутниковой океанографии, Российский государственный гидрометеорологический университет (г. Санкт-Петербург)

Носов Михаил Александрович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики моря и вод суши, физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова (г. Москва)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Морской гидрофизический институт Российской академии наук» (г. Севастополь)

Защита диссертации состоится 30 сентября 2024 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.238.01 в ИПФ РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте [iprfan.ru](http://rfgan.ru) ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Автореферат разослан 20 августа 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Э.Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Морские штормы и ураганы, сопровождающиеся экстремальными ветрами и волнением, штормовыми нагонами, ливневыми осадками и катастрофическими наводнениями, представляют большую угрозу для жителей прибрежных районов и морской деятельности. Для снижения вреда и ущерба, приносимого этими погодными явлениями, требуется улучшить заблаговременность и уменьшить погрешность прогноза параметров морских штормов (траектории, интенсивности и т. п.). С учетом редкой сети традиционных гидрометеорологических наблюдений в открытом океане особенно актуально использование дистанционных спутниковых методов, обеспечивающих высокую производительность гидрометеорологического мониторинга на больших акваториях и расширение списка оцениваемых параметров. Приоритетное значение имеет использование излучения микроволнового диапазона, позволяющее получать информацию об океане и атмосфере независимо от времени суток и облачности. Однако существующие алгоритмы определения геофизических параметров по данным спутникового дистанционного зондирования с помощью как активных (радиолокаторы, скаттерометры), так и пассивных (радиометры) приборов, имеют физические ограничения применимости при штормовых и ураганных условиях.

Ограничения на использование активных радиолокационных методов определения скорости приводного ветра, U_{10} , связаны с немонотонностью зависимости удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) морской поверхности от скорости ветра, превышающей 30 м/с (см., например, семейство алгоритмов CMOD). Это приводит к быстрому нарастанию погрешностей в определении скорости ветра больше 25–30 м/с и даже к ошибкам в определении формы урагана. В ряде работ [1, 2] было показано, что сечение обратного рассеяния поверхности моря на ортогональной поляризации характеризуется сильной (кубичной) зависимостью от U_{10} , не испытывающей насыщения при скоростях ветра выше 25 м/с [1–3].

Восстановление скорости приводного ветра основано на применении эмпирической зависимости, связывающей ее значения с сечением рассеяния поверхности океана – так называемой геофизической модельной функции (ГМФ). Основная проблема в определении ГМФ состоит в получении данных наземных наблюдений в условиях урагана, в связи с чем неопределенность ГМФ и связанные с ней ошибки в определении скорости ветра остаются высокими. В таких условиях возрастает роль теоретической или полуэмпирической модели, которая позволяет учесть и описать факторы, определяющие ГМФ, и ее верификация в контролируемых условиях.

Наряду со скоростью приводного ветра турбулентный поток импульса или касательное турбулентное напряжение, τ , является важнейшей динамиче-

ской характеристикой приводного пограничного слоя атмосферы. Эта величина характеризует силовое касательное воздействие ветра на поверхность воды и определяет поток энергии к волнам, их параметры [4] и параметры ветрового нагона, (см., например, [5]), является движущей силой циркуляции океана [6], определяет перемешивание в верхнем слое океана, которое, в свою очередь, определяет температуру поверхности океана, обеспечивает вентиляцию глубинных слоев океана, способствуя биопродуктивности [7, 8]. Прямых алгоритмов восстановления величины τ по данным дистанционного зондирования не существует. Применяются не прямые методы, основанные на использовании данных дистанционного определения скорости приводного ветра и эмпирических функций, связывающих U_{10} и τ , которые имеют значительные погрешности при высоких скоростях ветра. С учетом ограничений дистанционных методов определения U_{10} корректное определение τ при этих условиях становится практически невозможным.

Цели и задачи диссертации

Целью работы является построение полуэмпирической модели рассеяния микроволнового излучения на поверхности воды в присутствии ветрового волнения для разработки метода восстановления скорости приводного ветра и турбулентного касательного напряжения в условиях шторма и урагана. Для этого решались следующие задачи:

1. Экспериментальное исследование механических свойств поверхности воды под действием штормового ветра, определяющих характеристики рассеяния микроволнового излучения, включая ветровое волнение и обрушения волн, типичных для условий шторма.

2. Экспериментальное исследование зависимости сечения рассеяния поляризованного микроволнового излучения при различных поляризациях излучаемой и принимаемой электромагнитной волны от скорости ветра, и турбулентного напряжения. Определение чувствительности характеристик рассеяния поверхности к изменению скорости ветра и касательного напряжения при условиях шторма.

3. Экспериментальное исследование рассеяния поляризованного микроволнового излучения на обрушениях волн, определение особенностей рассеяния на ортогональной поляризации.

4. Теоретическое описание рассеяния поляризованного микроволнового излучения на взволнованной поверхности воды в отсутствие обрушений.

5. Построение композитной модели рассеяния поляризованного микроволнового излучения на поверхности воды в присутствии ветрового волнения и обрушений и ее верификация на основе данных эксперимента.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы определяется оригинальными методами исследования и полученными новыми результатами.

1) На основе анализа доплеровских спектров радиолокационного сигнала, рассеянного на поверхности воды под действием штормового ветра в лабораторных условиях, и трехмерных пространственно-частотных спектров поверхностных волн показано, что рассеяние микроволнового излучения происходит в основном на рассеивателях, имеющих скорости, превышающие скорости энергонесущих ветровых волн. Предположение, что этими структурами являются обрушающиеся гребни волн, подтверждается анализом высокоскоростных видеофильмов поверхности воды.

2) Экспериментально измерена удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР) области обрушения поверхностной волны ("барашка").

3) Произведено численное моделирование УЭПР на ортогональной поляризации методом «малых уклонов» с использованием экспериментально измеренных спектров поверхностных волн при высоких скоростях ветра в присутствии поверхностных волн высокой крутизны.

4) На основе эмпирических данных об УЭПР области обрушения и теоретической модели рассеяния электромагнитных волн в приближении "малых уклонов" предложена композитная модель рассеяния электромагнитных волн на морской поверхности при штормовом ветре. На основе лабораторных экспериментов получено экспериментальное подтверждение применимости модели.

Научная и практическая значимость результатов работы

Полученные в работе результаты могут применяться для изучения процессов рассеяния радиолокационного сигнала и для интерпретации результатов натуральных и лабораторных экспериментов. Приведенные оценки влияния обрушающихся волн на УЭПР ортогональной поляризации при высоких скоростях ветра позволят конструировать ГМФ, основываясь на физических принципах механизмов рассеяния, а не на подборе аппроксимирующих функций. Учитывая сложность сбора данных в натуральных условиях и индивидуальность измерений инструментов дистанционного зондирования, связанную с техническими особенностями используемых приборов, предложенный подход позволит унифицировать предлагаемые ГМФ. Разработанные методики выделения обрушений по оптическим снимкам позволят произвести обработку большого числа как лабораторных, так и натуральных измерений.

Достоверность полученных результатов

Все полученные результаты обладают высокой степенью достоверности и являются обоснованными. Подтверждением этого служит хорошее качественное и количественное совпадение результатов, полученных в лаборатор-

ных и натуральных условиях. Физическая трактовка полученных результатов, находится в согласии с общепризнанными представлениями. Основные положения диссертации опубликованы в ведущих зарубежных журналах и монографиях, докладывались на международных и всероссийских конференциях и неоднократно обсуждались на семинарах в ИПФ РАН.

Положения, выносимые на защиту

1. Мощность электромагнитного излучения СВЧ-диапазона, рассеянного поверхностью воды на ортогональной поляризации, сохраняет чувствительность не только к скорости ветра, но и к динамической скорости ветра при ураганных условиях.

2. Основной вклад в формирование обратного рассеяния СВЧ-излучения в ортогональную поляризацию вносят обрушения на гребнях волн.

3. Предложенная и реализованная экспериментальная методика позволила измерить УЭПР области обрушения. УЭПР в ортогональную поляризацию в пределах экспериментальной точности не зависит от скорости ветра.

4. Композитная модель рассеяния электромагнитных волн в ортогональную поляризацию на морской поверхности, частично покрытой обрушениями, основанная на модели «малых уклонов» второго порядка и экспериментальных данных об УЭПР "изолированной" области обрушения, находится в хорошем согласии с данными лабораторных экспериментов.

5. Компонента УЭПР, связанная с рассеянием на ветровом волнении как в соосную, так и в ортогональную поляризацию, испытывает насыщение при высоких скоростях ветра. Возрастание рассеянного в ортогональную поляризацию сигнала с ростом скорости ветра обусловлено рассеянием на обрушениях волн и связано с увеличением доли площади поверхности, покрытой обрушениями.

Соответствие паспорту специальности 1.3.4. «Радиофизика»

2. Изучение линейных и нелинейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации волн в естественных и искусственных средах.

5. Разработка научных основ и принципов активной и пассивной дистанционной диагностики окружающей среды, основанных на современных методах решения обратных задач, а также методах дистанционного мониторинга гео-, гидросферы, ионосферы, магнитосферы и атмосферы. Радиоастрономические исследования ближнего и дальнего космического пространства.

Апробация результатов работы

Диссертация выполнена в Институте прикладной физики РАН. Результаты диссертации были использованы в ходе исследовательских работ в рамках грантов РФФИ и РНФ.

Основные результаты и положения работы доложены:

– На международных конференциях: EGU General Assembly (Вена, Австрия, 2021, 2022), IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Техас, США, 2017), SPIE Remote Sensing 2021, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2022.

– 26-я Нижегородская сессия молодых ученых (Нижегород, 2021), 27-я Нижегородская сессия молодых ученых (Нижегород, 2022), Двадцать первая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2023), Двадцатая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2022), Девятнадцатая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2021), XXII Научная конференция по радиофизике (Нижегород, 2018), XXIII Научная конференция по радиофизике (Нижегород, 2019), Международная научная конференция-школа молодых ученых (Москва, 2022), Международная конференция «Гидроме-теорология и экология: достижения и перспективы развития» имени Л. Н. Карлина (Санкт-Петербург, 2022), Нижегородская сессия молодых ученых (Нижегород, 2021, 2022).

– На семинарах ИПФ РАН.

Всего по теме исследования опубликовано 7 статей в рецензируемых журналах [A1–A7], 6 тезисов докладов в сборниках трудов всероссийских и международных конференций [A8–A13].

Личный вклад автора

Автор диссертации принимал непосредственное участие в постановке и проведении экспериментов, описанных в работе и обработке полученных данных. Автор написал большую часть программного обеспечения, использованного при обработке данных, в том числе программы для восстановления пространственного спектра волнения по данным волнографов, программы для выделения обрушений на оптических изображениях водной поверхности, программу, реализующую моделирование рассеяния э/м излучения на водной поверхности при известном спектре волнения. Также автор принимал участие в обработке данных дистанционного зондирования и сопутствующих им измерений.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации составляет 89 страниц, включая 38 рисунков. Список литературы содержит 114 наименований, включая работы автора.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются её цели и задачи, кратко излагается содержание диссертации.

Глава 1 диссертации является обзорной. В ней даны основные определения методов дистанционного зондирования для восстановления поля скорости ветра. В разделе 1.1 описаны преимущества дистанционных методов зондирования и разделение методов на пассивные и активные. В разделе 1.2 описаны принципы измерения приповерхностной скорости ветра инструментами активной и пассивной радиолокации и дан краткий обзор действующих приборов. Раздел 1.3 посвящен проблемам восстановления высоких скоростей ветра, обзору существующих ГМФ и актуальности использования теоретических моделей, описывающих рассеяние сигнала морской поверхностью в экстремальных условиях. Сделан вывод о необходимости проведения одновременных измерений параметров ветрового потока, волнения и рассеянного сигнала в контролируемых лабораторных условиях для правильной интерпретации результатов и переносе его на натурные условия.

Глава 2 диссертации посвящена описанию лабораторной установки «Высокоскоростной ветро-волновой канал на базе Большого термостратифицированного бассейна ИПФ РАН», приборной базы и методик измерений. В разделе 2.1 описаны проблемы использования данных дистанционного зондирования, полученных в натуральных условиях и обосновано использование комплексного подхода, сочетающего в себе лабораторные эксперименты, теоретический анализ и численное моделирование с последующей верификацией полученных результатов.

В разделе 2.2 описано устройство и характеристики канала, в котором происходит лабораторное моделирование ветро-волнового взаимодействия при ураганных скоростях. Максимальная скорость воздушного потока на оси аэродинамического канала достигает 33 м/с, что при пересчете на натурные условия соответствует скорости ветра на высоте 10 м около 50 м/с. Рабочая секция располагается на расстоянии 8 м от входа в канал, при этом при скоростях ветра от 30 до 50 м/с характерная длина регулярно обрушающихся ветровых волн в ней составляет от 0,6 м до 1 м. Бассейн оборудован управляемым волнопродуктором поверхностных волн, расположенным у входного сечения канала, который обеспечивает эффективную генерацию волн с длинами больше 1,3 м (частота 1,1 Гц).

В разделе 2.3 описываются использованные контактные методы измерения параметров ветрового потока в канале. Для измерения характеристик воздушных потоков в рабочей секции совместно использовались пневмометрическая трубка Пито и термоанемометр. Они были соединены друг с другом и размещены на едином сканирующем устройстве. Оба датчика имеют одинаковый диаметр, а уровень измерительной головки термоанемометра совпадал с уровнем входного отверстия динамического давления Пито. Это обес-

печивало одинаковый уровень измерений скорости и температуры воздушно-го потока.

В разделе 2.4 описывается устройство системы трех струнных волнографов и предлагается методика для восстановления пространственно-временных спектров волнения. Алгоритм обработки сигналов описан в [9]. По зависимостям возвышения поверхности воды от времени в трех точках восстанавливается трехмерный пространственно-временной спектр возвышений $S(\omega, k, \theta)$ и двумерный наклон поверхности воды. Наибольшее измеримое такой системой волнографов волновое число ограничено базой d , то есть расстоянием между точками измерения, $k_{\max} = \pi / d$.

Раздел 2.5 посвящен описанию доплеровского скаттерометра X-диапазона с длиной волны 3,2 см с синхронным приемом согласованных и ортогональных поляризаций, его калибровке и измерению диаграммы направленности. Калибровка скаттерометра производилась на отражателе с известной эффективной площадью рассеяния (ЭПР). В случае согласованных поляризаций в качестве такого отражателя выступил металлический шар, для калибровки ортогональных поляризаций использовалась вращающаяся струна, последовательно закрепляемая в различных положениях относительно вертикали. Были проведены измерения диаграммы направленности антенны.

Представленные в главе 2 результаты отражены в публикациях [A1, A3].

В Главе 3 диссертации описываются результаты моделирования механических характеристик приводного слоя воздуха и поверхности воды в условиях шторма. В разделе 3.1 описаны различия ветро-волнового взаимодействия в натуральных и лабораторных условиях. Сделан вывод о возможности моделирования особенностей воздушного потока над водной поверхностью в лабораторных условиях. Раздел 3.2 посвящен восстановлению параметров воздушного потока в канале, коэффициента аэродинамического сопротивления и динамической скорости, на основе свойства автомодельности профиля дефекта скорости [10].

В разделе 3.3 исследованы особенности ветрового волнения, наблюдаемого в канале при высоких скоростях воздушного потока. На рис. 1, *a* изображены контурные линии двумерного спектра насыщения поверхностных волн $k_x^4 S_2(c_x, k_x)$. Видно, что фазовые скорости волн в спектральном пике согласуются с законом дисперсии линейных гравитационных волн, а фазовые скорости волн в спектральном хвосте практически не зависят от волнового числа и заметно превышают фазовые скорости линейных свободных поверхностных волн. Это может быть интерпретировано как присутствие связанных волн, вызванное нелинейностью. На рис. 1, *б* видно, что пиковые скорости связанных волн составляют около 80% пиковой скорости спектра ветрового волнения.

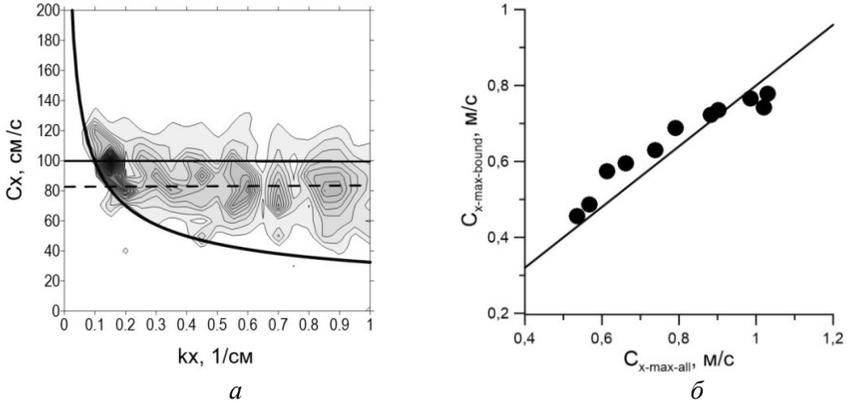


Рис. 1. Контурные линии 2D спектра насыщения (а): продольная составляющая фазовой скорости c_x , продольная составляющая волнового числа k_x , жирная сплошная кривая – фазовая скорость линейных гравитационно-капиллярных волн $U_{10}=31,0$ м/с. Сплошная линия соответствует фазовой скорости пика спектра вдоль ветра, штриховая линия — фазовой скорости волн в хвосте спектра. Зависимость пиковой фазовой скорости спектров связанных волн от пиковых скоростей всех спектров ветрового волнения (б). Сплошная линия — линейная функция $c_{x-\max-bound} = 0.8 \cdot c_{x-\max-all}$.

Также были построены пространственные спектры волнения $S(k)$ и была исследована асимптотика спектра при больших значениях волновых чисел. В лабораторных условиях выполняется высокочастотная асимптотика k^{-3} , что соответствует спектру насыщения Филлипса [11]. При этом при малых скоростях ветра асимптотики смещаются в область длин волн, нерегистрируемых системой волнографов. Также для каждой скорости ветра было построено распределение вероятности уклонов, оцененное по временному ряду уклонов водной поверхности из измерений струнных волнографов. Распределение отличается от Гауссовой функции, и медленнее спадает в направлении, совпадающем с направлением скорости ветра. Используя полученные распределения, можно оценить вероятность возникновения обрушений, как вероятность превышения порогового угла, при котором волны обрушаются.

Раздел 3.4 посвящен экспериментальному исследованию динамики обрушающегося гребня волны под действием воздушного потока. Было проведено две серии экспериментов. В первой из них изучалось обрушение на наклонной погруженной пластине искусственно генерируемых волн в присутствии высокоскоростного воздушного потока в канале. Волнопродуктор генерировал цуги волн с центральной частотой 1,1 Гц, содержащие три периода колебаний 1 раз в 15 секунд. Область измерения располагалась на расстоянии 10 м от начала канала. Погруженная пластина располагалась перед областью измерения. Поверхность воды освещалась однородным источником и производилась ее съемка двумя камерами Sygnet CY2MP-CL-SN с объективами 50 мм

для исключения ложного детектирования бликов в качестве областей обрушения. Обработка полученных изображений включала в себя вычитание фона, преобразование изображений в лабораторную систему координат, связанную с подводной пластиной, морфологические преобразования, направленные на уменьшение шума и сокрытие ярких элементов изображений недостаточного размера, бинаризацию изображений по выбранному порогу и сопоставление результатов обработки, полученных двумя камерами для исключения бликов. В результате для каждой скорости ветра была найдена зависимость доли поверхности, покрытой обрушениями, от времени после включения волнопродуктора. Во второй серии экспериментов изучалось обрушение в поле волн, генерируемых ветром. При эквивалентных скоростях ветра от 30 до 50 м/с характерная длина регулярно обрушающихся ветровых волн канале на расстоянии 10 м от входного сечения канала составляет от 0,6 м до 1 м.

Для вычисления площади обрушений ветровых волн был использован алгоритм, аналогичный описанному выше. На рис. 2 приведены полученные в результате зависимости доли поверхности, покрытой обрушениями, от скорости воздушного потока и его динамической скорости.

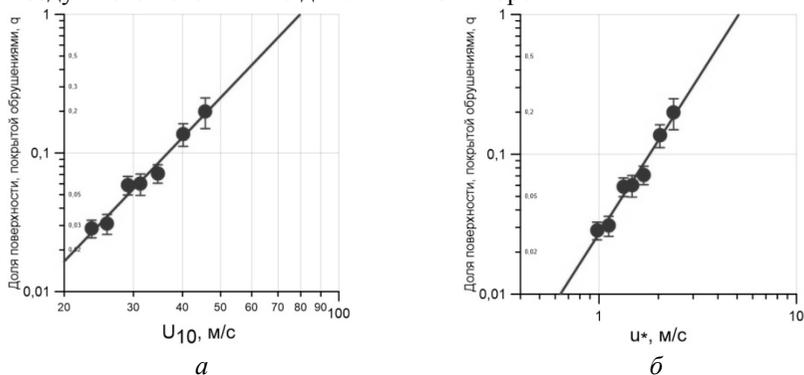


Рис. 2. Зависимость доли обрушений от скорости ветра на высоте 10 м (а). Зависимость доли обрушений от динамической скорости воздушного потока (б). Линии – аппроксимации степенными функциями.

Полученные зависимости доли водной поверхности, покрытой обрушениями, от скорости воздушного потока либо его динамической скорости могут быть аппроксимированы степенной функцией вида

$$q = 2,28e^{-006} \cdot U_{10}^{2,97}, \quad (1)$$

$$q = 0,03 \cdot u_*^{2,21}. \quad (2)$$

При этом необходимо отметить, что аппроксимация зависимости площади обрушений на водной поверхности от скорости воздушного потока сте-

пенной функцией (1) дала величину степени 2,97, что соотносится с общими представлениями о кубической зависимости этой величины от скорости ветра в открытом океане [12].

Представленные в **главе 3** результаты отражены в работах [A2–A4].

Глава 4 диссертации посвящена экспериментальному исследованию рассеяния электромагнитных волн СВЧ-диапазона на поверхности воды под действием сильного ветра. В **разделе 4.1** дано краткое описание механизмов, ответственных за рассеяние сигнала при различных углах зондирования и обоснована необходимость отдельного исследования влияния облучений и отраженный сигнал. В **разделе 4.2** описан эксперимент, проведенный на ветроволновом канале, и приведены полученные зависимости УЭПР на четырех поляризациях (HH, VV, HV, VH) для трех значений угла падения (для направления зондирования по ветру и против ветра) от динамической скорости ветра (рис. 3).

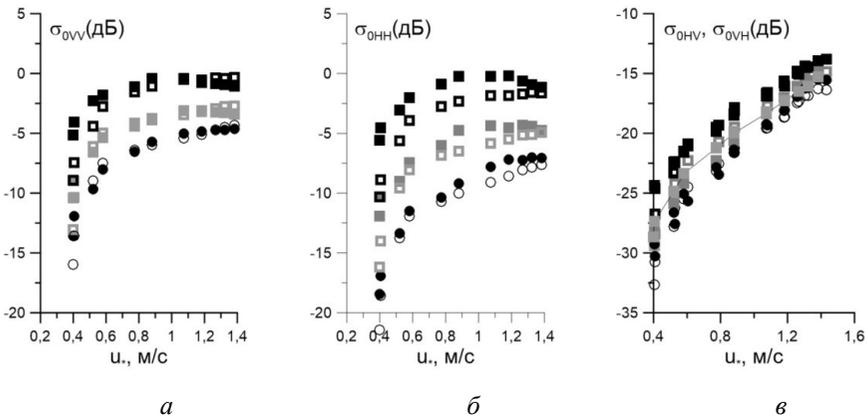


Рис. 3. Соосная и ортогональная поляризации УЭПР водной поверхности в зависимости от динамической скорости ветра, для разных углов падения: черные квадраты – 30°, серые квадраты – 40°, черные кружки – 50°, закрытые символы для направления зондирования против ветра и открытые символы для наблюдения по ветру.

Видно, что сигнал на ортогональной поляризации имеет более высокую чувствительность к изменению скорости трения для всех углов по сравнению с соосной поляризацией. От 1 м/с наблюдается тенденция к насыщению зависимости УЭПР от u_* для сигнала на соосной поляризации, в то время как УЭПР ортогонально поляризованного радиолокационного сигнала демонстрирует монотонную зависимость от u_* .

Для выяснения природы рассеяния, формирующего СВЧ-сигнал, отраженный от поверхности воды, в **разделе 4.3** был проведен анализ доплеровского спектра радиолокационного сигнала. Доплеровские спектры сигналов

формируются за счет рассеяния на движущихся вдоль водной поверхности элементах, рассеивателях, движущихся со скоростью $v = \lambda_0 f / 2 \sin \theta$, где f – доплеровский сдвиг частот. Анализ показал, что пиковая скорость доплеровских рассеивателей $VDopmax$ увеличивается с увеличением u_* и U_{10} . Этот результат отличается от предположения, что пиковая скорость доплеровских спектров отраженного сигнала на ортогональной поляризации не зависит от скорости ветра [13]. Это означает, что, по-видимому, при сильном ветре существует дополнительный механизм, ответственный за обратное рассеяние на прямой и перекрестной поляризациях. Данные на рис. 4 показывают, что для случая зондирования против направления ветра, $VDopmax$ в среднем превышает фазовую скорость преобладающих волн $Cxmax$, а для зондирования по ветру значения $VDopmax$ ниже $Cxmax$. Это означает, что для случая зондирования против ветра обратный сигнал формируется рассеивателями, движущимися в среднем быстрее, чем доминирующие волны, а для случая зондирования по ветру рассеиватели имеют средние скорости ниже фазовой скорости доминирующих поверхностных волн. Однако в обоих случаях скорости рассеивателей задаются $Cxmax$ и увеличиваются со скоростью ветра так же, как и $Cxmax$. Для качественной интерпретации природы структур, ответственных за обратное рассеяние от водной поверхности со сложной реологией, типичной для условий сильного ветра, было проведено сравнение скорости $VDopmax$ со скоростями обрушающихся гребней волн и связанных волн, измеренных независимо.

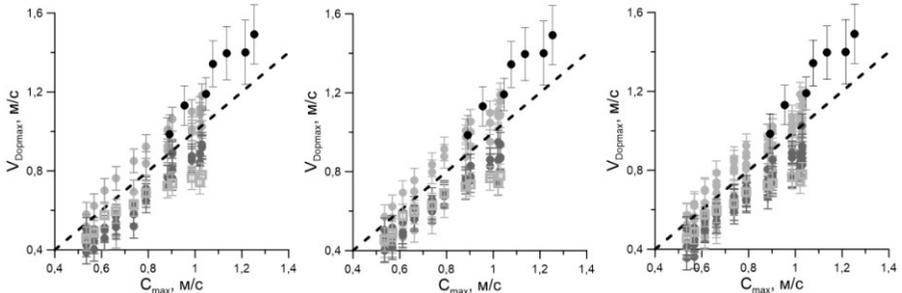


Рис. 4. Пиковые скорости доплеровских спектров радиолокационного сигнала для зондирования против ветра (светло-серые кружки) и по ветру (темно-серые кружки) относительно продольной фазовой скорости доминантных волн, угол падения $30\text{-}50^\circ$, U_{10} находится в пределах от $12,4$ м/с до $32,8$ м/с. Черные кружки – скорости гребней обрушающихся волн, светлые серые квадраты – фазовые скорости связанных волн. Штриховая линия – биссектриса.

Скорости гребней волн оценивались непосредственно по высокоскоростной видеосъемке вида сверху водной поверхности, визуализируемой теньевым методом с использованием подсветки снизу. Сравнение экспериментальных данных, представленных на рис. 4, показывает, что пиковые скорости допле-

ровских спектров, полученные для зондирования против ветра, близки к скоростям обрушающихся гребней, а скорости пиков доплеровских спектров для зондирования по ветру близки к максимумам спектров связанных волн. Эти особенности доплеровских спектров можно качественно интерпретировать следующим образом. Доминирующий вклад в сигнал обратного рассеяния формируют обрушающиеся гребни волн, которые по определению опережают доминирующие поверхностные волны. Структура водной поверхности в обрушениях очень сложная, включающая пенную фракцию, брызги, фрагменты жидкости, срываемые сильным ветром с гребней волн и др. (см., например, [14]). Ожидается, что из-за своей сложной структуры обрушающиеся волны будут обладать деполаризующими свойствами и могут оказывать значительное влияние на рассеяние сигнала на ортогональной поляризации, подобно слою пены, рассмотренному в работе [15]. Очевидно, что обрушающийся гребень должен вносить большой вклад в обратное рассеяние, направленное против ветра, потому что в случае зондирования по ветру он частично закрыт.

Раздел 4.4 посвящен измерению характеристик микроволнового сигнала на искусственно сгенерированных волнах, обрушающихся на подводной пластине (постановка эксперимента описана в разделе 3.4). Радиолокационные измерения проводились доплеровским скаттерометром X-диапазона. И для оптического, и для радиолокационного экспериментов исследовался цуг из трех волн, обрушающийся на заглубленной подводной пластине. Однако из-за технических особенностей установки скаттерометра в случае р/л эксперимента пластина располагалась ближе к началу канала на 1 м. В связи с этим во временных зависимостях пенного покрытия и УЭПР существует временная задержка, величина которой была вычислена с помощью корреляционно-го метода.

Было обнаружено, что после прохождения длинной обрушающейся волны, поверхность выглаживается, и мощность рассеянного сигнала определяется площадью пенного покрытия. Эффект выглаживания водной поверхности после прохождения обрушающейся волны также был получен в работе [16]. Для дальнейшей обработки была выбрана вторая волна цуга, поскольку ее обрушение проходило на выглаженной откатом предыдущей волны водной поверхности, и таким образом практически исключалось влияние коротковолновой ряби на формирование рассеянного сигнала. Этот эффект можно наблюдать для совмещенных зависимостей УЭПР от доли пенного покрытия при всех скоростях ветра (рис. 5). Независимо от скорости воздушного потока точки зависимости УЭПР от доли обрушений группируются возле одной кривой. Это указывает на то, что зависимость УЭПР от доли обрушений не зависит от скорости ветра, а значит, и от параметров волнения, которое определяется скоростью ветра.

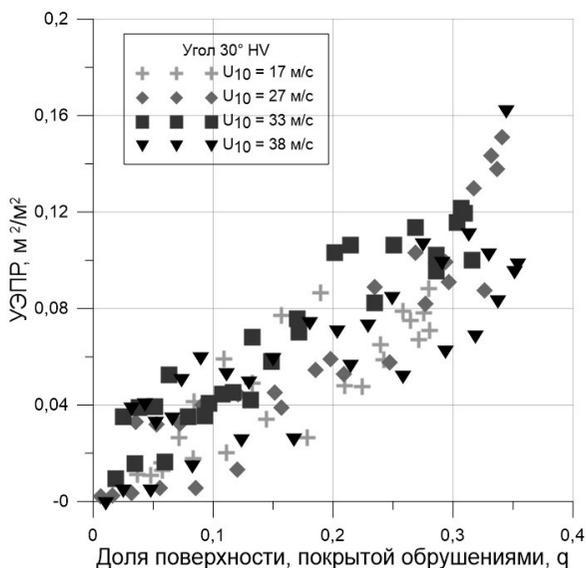


Рис. 5. Зависимость УЭПР водной поверхности при разных скоростях ветра для ортогональной поляризации HV от доли пенного покрытия для 30°.

При этом σ_{HV} должна возрастать прямо пропорционально доле, которую составляет площадь обрушения в пятне засветки, q :

$$\sigma_{HV} = \alpha_{HV} \cdot q. \quad (3)$$

На рис. 6 показаны бинированные зависимости УЭПР от доли поверхности, покрытой обрушениями, при трех углах зондирования, где объединены все скорости ветра и обе перекрестные поляризации.

Для более пологих углов зондирования (40° и 50°) обнаружен резкий скачок зависимости УЭПР при увеличении доли обрушений выше 0,24, которые соответствуют непосредственно обрушению гребня волны в центре области наблюдения. Возможно, это связано с переотражениями сигнала на полостях внутри обрушений.

Поскольку характерные значения доли обрушений в лабораторном эксперименте без искусственного обрушения волн редко достигали величины 0,2, при обработке учитывалась линейная часть зависимости. Аппроксимация данных дала следующие величины коэффициентов пропорциональности: $[\alpha_{30^\circ}; \alpha_{40^\circ}; \alpha_{50^\circ}] = [0,36 \pm 0,04; 0,21 \pm 0,03; 0,19 \pm 0,03]$.

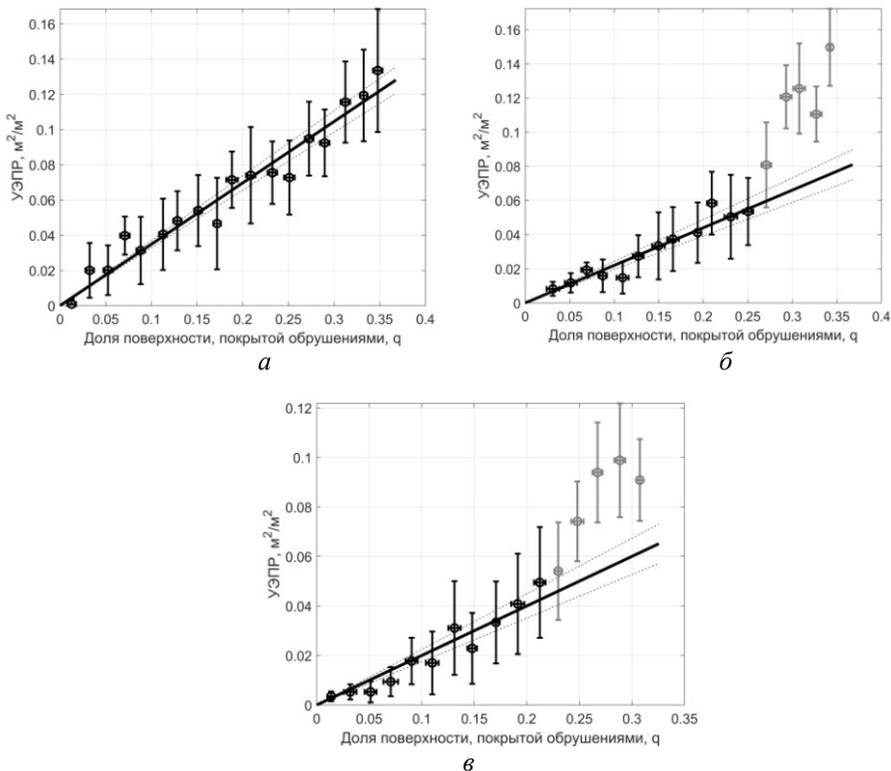


Рис. 6. Зависимости УЭПР водной поверхности для ортогональной поляризации НУ от доли пенного покрытия для трех углов падения – 30° (*а*), 40° (*б*), 50° (*в*). Сплошная линия – аппроксимация зависимости формулой (3).

В [разделе 4.5](#) предложена параметризация доли обрушений на водной поверхности из данных измерений струнных волнографов, основанная на статистическом описании возникновения обрушений. Площадь обрушения прямо пропорциональна произведению вероятности появления обрушения и его средней площади. Сравнение площади обрушений на водной поверхности, полученной из оптических измерений и по данным волнографов, дало схожие результаты.

Представленные в [главе 4](#) результаты отражены в работах [А3, А5, А6].

[Глава 5](#) диссертации посвящена предложенной модели рассеяния микроволнового излучения на водной поверхности. В [разделе 5.1](#) описаны особенности лабораторного моделирования рассеяния сигнала на обрушающихся волнах и обсуждено различие в пенных структурах на водной поверхности в лабораторных и натуральных условиях.

Раздел 5.2 посвящен конструированию композитной модели рассеяния излучения на водной поверхности, отдельно учитывающей вклад от ветровых волн и от обрушений. Для построения ГМФ примем во внимание, что рассеяние от поверхности определяется некогерентным сложением сигналов, рассеянных областями обрушения, и частью поверхности воды, свободной от обрушений, аналогично [17]:

$$\sigma_{HV} = \sigma_{BR}q + \sigma_{SSA}(1 - q), \quad (4)$$

где первое слагаемое отвечает за вклад в рассеяние от обрушений, а второе – за рассеяние сигнала на ветровых волнах, вычисленное с помощью метода малых уклонов [18] напрямую из измеренных спектров волнения.

Вклад обрушений в рассеянный сигнал был учтен с помощью измеренных зависимостей площади пенного покрытия от скорости ветра и эмпирически полученной УЭПР обрушающейся волны. На рис. 7 приведен вклад каждого из слагаемых в композитную модель и расчеты УЭПР в рамках двухмасштабной модели [19], которая значительно недооценивает мощность рассеянного сигнала на ортогональной поляризации, по сравнению с методом малых наклонов. Из рассчитанных зависимостей видно, что сигнал на ортогональной поляризации, рассеянный на ветровых волнах, демонстрирует тенденцию к насыщению аналогично сигналу на соосной поляризации.

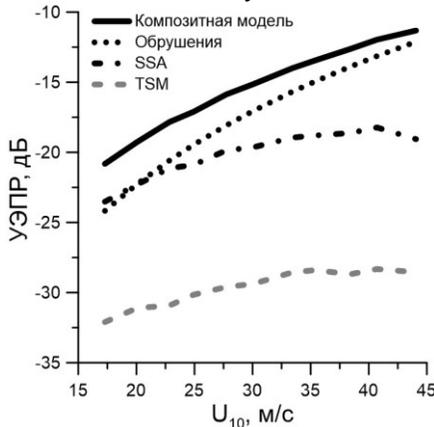


Рис. 7. Зависимость УЭПР на ортогональной поляризации, рассчитанная в рамках модели SSA-2, оценке вклада обрушений, по предложенной ГМФ и по двухмасштабной модели (two-scale model, TSM) для угла падения 30°.

При этом непрерывный рост УЭПР при высоких скоростях ветра, наблюдаемый в экспериментальных данных, обеспечивается за счет рассеяния на обрушающихся гребнях волн, что следует из анализа предложенной ГМФ. На рис. 8 приведено сравнение экспериментально измеренных зависимостей УЭПР водной поверхности со спорадическим характером обрушений ветро-

вых волн при различных скоростях ветра для трёх углов зондирования и рассчитанных по предложенной композитной модели.

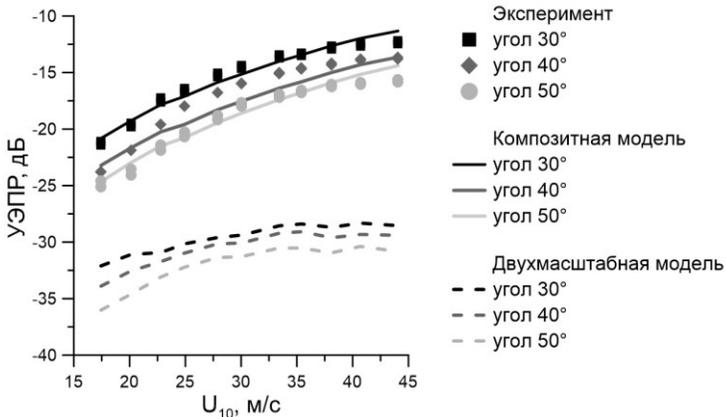


Рис. 8. Сравнение экспериментально измеренной УЭПР с теоретическим расчетом по предложенной ГМФ.

Предложенная модель демонстрирует хорошее совпадение с экспериментальными измерениями. Функциональные отличия модели и экспериментальных данных вероятнее всего связаны с качественной эволюцией структур обрушения, которые отвечают за деполяризацию сигнала. В то же время, сравнение с результатами расчетов двухмасштабной модели дают возможность сделать вывод о правильности выбора модели SSA для моделирования рассеяния сигнала на ветровых волнах. Способность предложенной полуэмпирической модели описывать поведение УЭПР на ортогональной поляризации говорит о возможности использовать разработанную методику для конструирования ГМФ, применимых к данным натуральных измерений. Основное отличие будет заключаться в необходимости использования морского, а не лабораторного спектра волнения и пересчете доли обрушений на водной поверхности на натурные условия.

В [разделе 5.3](#) предложенная композитная ГМФ была перенесена на натурные условия. Доля поверхности воды, покрытой обрушениями, зависит от скорости ветра и параметров волнения. Эта характеристика в натуральных условиях экспериментально исследовалась многими авторами, например, [20]. При этом следует различать область обрушения волны ("active whitecap") и пенный след, остающийся после обрушения волны ("maturing whitecap"). В работе [21] соответствующее разделение было произведено, и отдельно изучены свойства обоих типов пенных образований на поверхности воды. В лабораторных экспериментах измеряются характеристики обрушающегося гребня волны, и именно они соотносятся с рассеянием на ортогональной поляризации. В связи с этим для определения параметра q были использованы

данные об "active whitecap" из [21]. Рисунок 9 показывает хорошее согласие расчетов по формуле (4) и натуральных данных из работы [A7], полученных путем совмещения измерений SFMR и PCA-изображений тропических циклонов со спутника Sentinel-1. Геофизическая модельная функция (4) показывает заметную чувствительность к скорости приводного ветра в условиях урагана и может служить основой для разработки алгоритма восстановления скорости ветра в ураганах по данным рассеяния микроволнового излучения на ортогональной поляризации. Расхождение с экспериментальными данными в области высоких скоростей ветра может быть вызвано как существенным влиянием на результат выбираемой параметризации $u_* (U_{10})$, так и отличиями УЭПР обрушений в С и Х-диапазонах.

Представленные в главе 5 результаты отражены в публикациях [A5, A7].

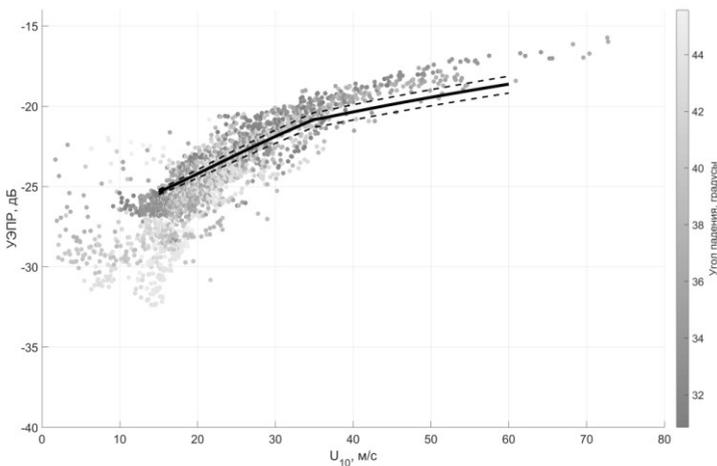


Рис. 9. Сопоставление УЭПР на ортогональной поляризации и скорости ветра, полученной по PCA-изображениям ураганов со спутника Sentinel-1 [A7]. Сплошная линия – расчет по композитной модели.

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основе лабораторного моделирования рассеяния СВЧ-радиоволн на поверхности воды под действием штормового ветра показано, что мощность рассеянного электромагнитного излучения в ортогональную поляризацию, сохраняет чувствительность не только к скорости ветра, но и к динамической скорости ветра при ураганных условиях.

2. Экспериментально показано, что рассеяние СВЧ-радиоволн в ортогональную поляризацию обусловлено неоднородностями на поверхности, движущимися со скоростями, превышающими примерно на 20% фазовые скорости энергонесущих ветровых волн, которые были идентифицированы как обрушающиеся гребни волн.

3. Предложена и реализована экспериментальная методика, позволяющая измерить УЭПР области обрушения. Экспериментально показано, что УЭПР в ортогональную поляризацию в пределах экспериментальной точности не зависит от скорости ветра.

4. Построена композитная модель рассеяния электромагнитных волн в ортогональную поляризацию на морской поверхности, частично покрытой обрушениями, основанная на применении модели «малых уклонов» второго порядка и экспериментальных данных об УЭПР "изолированной" области обрушения. Верификация на основе результатов лабораторных экспериментов подтвердила применимость предложенной композитной модели к описанию рассеяния СВЧ-радиоволн на поверхности воды, находящейся под действием штормового ветра.

5. Показано, что рост УЭПР в ортогональную поляризацию при возрастании скорости приводного ветра обусловлен ростом доли поверхности, покрытой обрушениями, в то время как вклад в УЭПР от ветрового волнения испытывает насыщение.

6. Показано, что компонента УЭПР, связанная с рассеянием на ветровом волнении как в соосную, так и в ортогональную поляризацию, испытывает насыщение при высоких скоростях ветра. Возрастание рассеянного в ортогональную поляризацию сигнала с ростом скорости ветра обусловлено рассеянием на обрушениях волн и связано с увеличением доли площади поверхности, покрытой обрушениями.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang B., Perrie W. Cross-polarized synthetic aperture radar: a new potential technique for hurricanes // Bulletin of the American Meteorological Society. 2012 V. 93, № 4. P. 531–541.

2. Hwang P.A., Zhang B., Perrie W. Depolarized radar return for breaking wave measurement and hurricane wind retrieval // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37, L01604.

3. Mouche A., Chapron B., Knaff J., Zhao Y., Zhang B., Combot C. Copolarized and cross-polarized SAR measurements for high-resolution description of major hurricane wind structures: Application to Irma category 5 hurricane // Journal of Geophysical Research: Oceans. V. 124. P. 3905–3922.

4. Plant, W. J. A relationship between wind stress and wave slope // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. P. 1961–1967.

5. Moon I., Kwon J.I., Lee J.-C., Shim J.-S., Kang S. K., Oh I. S., Kwon S. J. Effect of the surface wind stress parameterization on the storm surge modeling // *Ocean Modelling*. 2009. V. 29, № 2. P. 115–127
6. Sverdrup H.U. Wind-driven currents in a baroclinic ocean, with application to the equatorial currents of the eastern Pacific // *Proc. Natl. Acad. Science*. 1947. V. 33. P. 318–326.
7. Liu W. T., Xie X., Tang W. Scatterometer's unique capability in measuring ocean surface stress // *Oceanography from Space*. 2016. P. 93–111.
8. Liu, W. T., Xie X. Sea surface wind/stress vector // *Encyclopedia of Remote Sensing 2014* E. Njoku, Ed., Springer-Verlag.
9. Donelan M.A., Drennan W.M., Magnusson A.K. Nonstationary Analysis of the Directional Properties of Propagating Waves // *Journal of Physical Oceanography*. 1996. V. 26. P. 1901-1914.
10. Troitskaya Yu. I., Sergeev D.A., Kandaurov A.A., Baidakov G.A, Vdovin M.A., Kazakov V.I. Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions // *Journal of Geophysical Research*. 2012. V. 117. C00J21.
11. Phillips O.M. *The Dynamics of the Upper Ocean* // Cambridge Univ. Press. 2-nd ed., 1977.
12. Monahan C., O'Muircheartaigh I. G. Whitecaps and the passive remote sensing of the ocean surface // *International Journal of Remote Sensing*. 1986. V. 7. P. 627–642.
13. Fois F., Hoogeboom P., Chevalier F. L., Stoffelen A. An analytical model for the description of the full-polarimetric sea surface Doppler signature // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2015. V. 120. P. 988–1015.
14. Troitskaya Yu., Kandaurov A., Ermakova O., Kozlov D., Sergeev D., Zilitinkevich S. Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds // *Sci. Rep*. 2017. V. 7.
15. Fois, F., Hoogeboom P., Le Chevalier F., Stoffelen A. Future ocean scatterometry: On the use of cross-polar scattering to observe very high winds // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*. 2015. V. 53, № 9. P. 5009–5020.
16. Ermakov S., Dobrokhoto V., Sergievskaya I., Kapustin I. Suppression of Wind Ripples and Microwave Backscattering Due to Turbulence Generated by Breaking Surface Waves // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. P. 3618.
17. Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B. A semiempirical model of the normalized radar cross section of the sea surface, 2, Radar modulation transfer function // *J. Geophys. Res*. 2003. V. 108. P. 8055.
18. Guérin C. -A., Johnson J. T. A Simplified Formulation for Rough Surface Cross-Polarized Backscattering Under the Second-Order Small-Slope Approximation // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2015. V. 53, № 11. P. 6308-6314.
19. Valenzuela, G.R. Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves – A review // *Boundary-Layer Meteorol*. 1978. V. 13. P. 61–85.

20. *Bondur V. G., Sharkov E. A.* Statistical properties of whitecaps on a rough sea // *Oceanology*. 1982. V. 22. P. 274–279.

21. *Scanlon B., Ward B.* The influence of environmental parameters on active and maturing oceanic whitecaps // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2016. V. 121. P. 3325–3336.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

[A1]. *Troitskaya Yu., Abramov V., Ermoshkin A., Zuikova E., Kazakov V., Sergeev D., Kandaurov A., Ermakova O., Baidakov G., Rusakov N., Poplavsky E., Vdovin M.* X-band radar cross-section at GALE force winds: Towards cross-polarization GMF for retrieval of hurricane wind speed and surface stress // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2017. P. 1515–1518.

[A2]. *Troitskaya Yu.I., Abramov V.I., Baidakov G.A., Ermakova O.S., Sergeev D.A., Ermoshkin A.V., Kandaurov A.A., Rusakov N.S., Poplavsky E.I.* An empirical radar backscatter model at co-polarized and cross-polarized x-band under high-wind conditions // *Proc. SPIE 11857, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions* 2021.

[A3]. *Troitskaya Yu., Abramov V., Baidakov G., Ermakova O., Zuikova E., Sergeev D., Ermoshkin A., Kazakov V., Kandaurov A., Rusakov N., Poplavsky E., Vdovin M.* Cross-Polarization GMF For High Wind Speed and Surface Stress Retrieval // *Journal of Geophysical Research: Oceans* 123(8), August 2018.

[A4]. *Rusakov N., Baidakov G., Kandaurov A., Troitskaya Yu., Ermakova O.* Laboratory modelling of microwave signal scattering by breaking surface waves under strong wind conditions // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2022. P. 6955–6958.

[A5]. *Русаков Н.С., Байдаков Г.А., Троицкая Ю.И.* Композитная модель рассеяния радиоволн СВЧ-диапазона на водной поверхности при экстремальных скоростях ветра // *Доклады Российской академии наук. Науки о земле*, 2023, том 513, № 1, С. 139–145.

[A6]. *Baydakov G.A., Rusakov N.S., Kandaurov A.A., Sergeev D.A., Troitskaya Yu.I.* Investigation of Wave Breaking by Radar Measurements in the Laboratory Modeling // *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes—2022. PMMEEP 2022. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Springer, Cham. P. 461–468.

[A7]. *Ermakova O., Rusakov N., Poplavsky E., Sergeev D., Troitskaya Yu.* Friction Velocity and Aerodynamic Drag Coefficient Retrieval from Sentinel-1 IW Cross-Polarization C-SAR Images under Hurricane Conditions // *Remote Sensing*. 2023. V. 15, № 8.

[A8]. *Русаков Н.С., Поплавский Е.И., Байдаков Г.А., Троицкая Ю.И., Вдовин М.И., Ермакова О.С.* Экспериментальное исследование рассеяния микроволнового излучения на ветровых волнах // *Материалы 19-й Международной*

конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2021. С. 275.

[A9]. *Русаков Н.С., Байдаков Г.А., Кандауров А.А., Троицкая Ю.И.* Исследование рассеяния микроволнового излучения на обрушающихся волнах с использованием оптических методов // Материалы 20-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2022. С. 208.

[A10]. *Русаков Н.С., Байдаков Г.А., Ермакова О.С., Троицкая Ю.И.* Построение полумпирической геофизической модельной функции для ортогональной поляризации СВЧ излучения при экстремальных скоростях ветра // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2023. С. 244.

[A11]. *Байдаков Г.А., Русаков Н.С., Троицкая Ю.И.* Исследование вклада обрушений ветровых волн в рассеяние СВЧ сигнала на ортогональной поляризации в рамках лабораторного моделирования // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2023. С. 187.

[A12]. *Байдаков Г.А., Русаков Н.С., Кандауров А.А., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И.* Исследование обрушения волн радиолокационными методами в рамках лабораторного моделирования // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах. Материалы 8-й Международной научной конференции-школы молодых ученых. Москва, 2022. С. 187–188.

[A13]. *Байдаков Г.А., Русаков Н.С., Вдовин М.И., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И.* Дистанционная диагностика обрушающихся волн в рамках лабораторного моделирования // Сборник трудов VI Международной конференции "Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития" имени Л. Н. Карлина MGO-2022. Сборник трудов VI Международной конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 21–23.

РУСАКОВ Никита Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
РАСSEЯНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ В УСЛОВИЯХ ШТОРМОВОГО ВЕТРА**

Автореферат

Подписано к печати 10.06.2024 г.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 29(2024).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46