

УТВЕРЖДАЮ

Директор
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского
центра «Морской гидрофизический
институт РАН»
член-корреспондент РАН



Коновалов С.К.

» июль 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра
«Морской гидрофизический институт РАН»
на диссертационную работу
Русакова Никиты Сергеевича

«Исследование поляризационных характеристик рассеяния микроволнового
излучения на поверхности воды в условиях штормового ветра»
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.4 – Радиофизика

Актуальность темы работы. Морские штормы и ураганы сопровождаются высокими скоростями ветра, волнением, ливневыми осадками и штормовыми нагонами. Эти погодные явления представляют угрозу для судоходства, прибрежной инфраструктуры и жителей прибрежных районов. Редкая сеть гидрометеорологических наблюдений не обеспечивает достаточного пространственного разрешения измерений состояния морской поверхности и атмосферы. В связи с этим, приоритетное значение имеют спутниковые методы диагностики поверхности моря и океана. В настоящее время для восстановления поля скорости приводного ветра используются геофизические модельные функции (ГМФ). Как правило, эти эмпирические зависимости связывают удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР) морской поверхности со скоростью и направлением ветра. Алгоритмы восстановления скорости ветра имеют значительные погрешности при оценке параметров атмосферы и океана при интенсивных штормах из-за резкого падения чувствительности УЭПР к изменению скорости ветра в этих условиях. Для решения этой проблемы в последнее время рассматриваются

новые методы микроволнового зондирования поверхности океана, в частности, технология приема рассеянного сигнала на ортогональной поляризации, свободная от указанного недостатка. Кроме того, проблема при конструировании ГМФ состоит в сложности получения данных наземных измерений в условиях урагана. В связи с этим неопределенность предлагаемых в настоящее время ГМФ приводит к значительным ошибкам восстановления поля скорости ветра. С учетом этого возрастает роль теоретической или полуэмпирической модели, описывающей поляризационные характеристики рассеяния микроволнового излучения на поверхности воды в условиях штормового ветра, и ее верификация в контролируемых условиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Объем диссертации составляет 89 страниц. Текст диссертации иллюстрирован 38 рисунками. Список использованной литературы включает 114 наименований.

Основные результаты, полученные в диссертации.

В первой главе описаны объекты и предмет исследования. Традиционно конструирование ГМФ происходит путем совмещения данных радиолокационных измерений со скаттерометров или РСА с данными о скорости ветра. В качестве источников данных о скорости ветра могут быть использованы как контактные натурные измерения с буев или падающих GPS-зондов, так и дистанционные радиометрические измерения или данные реанализа. Приведен краткий обзор существующих ГМФ, из которого следует, что использование сигнала на соосной поляризации бесперспективно для восстановления поля скорости ветра в урагане из-за насыщения зависимости УЭПР при скоростях ветра более 20 м/с. Делается вывод, что наиболее целесообразным является использование ортогонально поляризованного сигнала, поскольку при такой методике измерения, УЭПР сохраняет чувствительность к изменению скорости ветра даже в экстремальных условиях. Несмотря на это, существующие ГМФ на ортогональной поляризации демонстрируют значительное расхождение восстанавливаемой скорости ветра. Это связано как с различным набором инструментов для получения данных о скорости приводного ветра, так и с проблемами совмещения радиолокационных и наземных измерений.

Механизмы, обеспечивающие непрерывный рост УЭПР на ортогональной поляризации вместе с ростом скорости ветра, до сих пор не изучены. Поверхность воды при высоких скоростях ветра обладает сложной структурой – интенсивные обрушающиеся волны, зоны пенообразования и брызги. В настоящее время существует множество противоречивых исследований о влиянии этих структур на рассеяние сигнала, однако оценка состояния водной поверхности при высоких скоростях ветра в натуральных условиях затруднена. В связи с этим, необходимо проведение лабораторного исследования взаи-

модействия мелкомасштабных структур на водной поверхности с микроволновым сигналом.

Во второй главе описана лабораторная установка «Высокоскоростной ветро-волновой канал на базе Большого термостратифицированного бассейна ИПФ РАН», приборная база и методики измерения. Максимальная скорость воздушного потока на оси канала достигает 33 м/с, что при пересчете на натурные условия соответствует скорости ветра на высоте 10 м около 50 м/с. Описаны применяемые приборные комплексы – трубка Пито и термоанемометр, струнные волнографы, доплеровский скаттерометр X-диапазона с длиной волны 3,2 см с синхронным приемом согласованных и ортогональных поляризаций.

В третьей главе описываются результаты моделирования механических характеристик приводного слоя воздуха и поверхности воды в условиях шторма. Сделан вывод о возможности моделирования особенностей воздушного потока над водной поверхностью в лабораторных условиях. Были исследованы особенности волнения в канале при высоких скоростях ветра, а именно, было обнаружено наличие связанных волн, проявляющихся как отсутствие зависимости фазовой скорости волн от волнового числа.

Было проведено экспериментальное исследование динамики обрушающегося гребня волны под действием воздушного потока. В первой серии экспериментов волнопродуктор, установленный в начале канала, генерировал цуг из трех длинных волн, обрушающихся на подводной пластине, имитирующей выход на мелководье. Такая постановка эксперимента позволила получать обрушающиеся волны в одной области с хорошей повторяемостью. Зона обрушения освещалась однородным источником света и производилась ее съемка с помощью двух камер. В результате для каждой скорости ветра была найдена зависимость доли поверхности, покрытой обрушениями, от времени после включения волнопродуктора. Во второй серии экспериментов изучались обрушения в поле волн, генерируемых ветром. Полученные зависимости доли водной поверхности, покрытой обрушениями, были аппроксимированы степенными функциями.

В четвертой главе описано экспериментальное исследование рассеяния электромагнитных волн СВЧ-диапазона на поверхности воды под действием сильного ветра. Описан эксперимент по измерению УЭПР водной поверхности на четырех поляризациях для трех углов падения (30° , 40° , 50°), для направления зондирования по и против ветра, от динамической скорости ветра. В лабораторных условиях было подтверждено наблюдавшееся в натуральных условиях насыщение зависимости УЭПР на соосной поляризации при динамической скорости ветра выше 1 м/с. УЭПР ортогонально поляризованного радиолокационного сигнала демонстрирует монотонный рост. Для выяснения природы рассеяния, формирующего СВЧ-сигнал, отраженный от поверхности воды, был проведен анализ доплеровского спектра радиолока-

ционного сигнала. Было продемонстрировано, что пиковые скорости доплеровских рассеивателей в случае зондирования против ветра в среднем превосходят фазовую скорость доминирующего волнения, а в случае зондирования по ветру, рассеиватели имеют скорость ниже скорости распространения волн. Сравнение экспериментальных данных показывает, что пиковые скорости доплеровских 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. Используя постановку эксперимента по исследованию динамики обрушающегося гребня волны, была количественно измерена УЭПР обрушения на ортогональной поляризации. Было обнаружено, что после прохождения длинной обрушающейся волны, водная поверхность выглаживается, и мощность рассеянного сигнала определяется только площадью пенного покрытия, в то время как влияние коротковолновой ветровой ряби на рассеянный сигнал почти исключается. Таким образом, было предположено, что при такой постановке эксперимента УЭПР водной поверхности должна возрастать прямо пропорционально площади обрушений, и была предложена соответствующая аппроксимация.

В пятой главе была предложена композитная модель рассеяния излучения на водной поверхности, отдельно учитывающая вклад от ветровых волн и от обрушений. Вклад обрушений был оценен путем применения результатов радиолокационного эксперимента по измерению УЭПР обрушающегося гребня волны и оптических измерений доли обрушений на водной поверхности при различных скоростях ветра. Оценка вклада ветрового волнения была произведена с использованием модели рассеяния «малых наклонов», примененной к экспериментально измеренным спектрам волнения. Верификация на основе результатов лабораторного моделирования подтвердила применимость предложенной модели к описанию рассеяния СВЧ-радиоволн на поверхности воды при высоких скоростях ветра. Было продемонстрировано, что основной вклад в рассеяние сигнала вносят обрушающиеся волны, и рост УЭПР в ортогональную поляризацию обусловлен ростом доли поверхности, покрытой обрушениями. Также показано, что вклад в УЭПР ветрового волнения как в соосную, так и в ортогональную поляризацию испытывает насыщение при высоких скоростях ветра. Предложенная модель была перенесена на натурные условия и продемонстрировала заметную чувствительность к скорости приводного ветра. Модель была валидирована на данных со спутника Sentinel-1.

Обоснованность и достоверность результатов. Обоснованность результатов основана на надежных методиках измерений и анализа данных, и подтверждается согласием предложенной теоретической модели с данными лабораторных измерений. Достоверность результатов подтверждается их согласием с натурными спут-

никовыми данными, а также публикациями материалов диссертации в рецензируемых журналах

Научная и практическая значимость. Теоретическая значимость исследования связана с тем, что полученные результаты расширяют существующие представления о механизмах рассеяния СВЧ-излучения на водной поверхности в условиях штормового ветра. Приведенные оценки вклада обрушающихся волн в ортогональную поляризацию позволят конструировать ГМФ, основываясь на физических принципах механизма рассеяния. Практическая значимость исследования обусловлена тем, что уточнение существующих ГМФ повысит точность восстановления скорости ветра в ураганах и штормах и соответственно, улучшит прогнозы их интенсивности и эволюции.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Полученные результаты можно использовать при конструировании ГМФ на ортогональной поляризации, а также как источник данных о функциональной зависимости УЭПР от доли обрушений, для восстановления экстремально высоких скоростей ветра из РСА-изображений полярных, тропических циклонов и ураганов.

Положительные особенности работы. Эта диссертационная работа удивляет обилием полученного материала, продуманностью экспериментов и смелостью выводов. Следует отдельно отметить постановку опытов по разделению вкладов в УЭПР от береговой ряби и обрушений, остроумно осуществленных на базе цугов из трех волн. С помощью численного моделирования автору удалось построить теорию, объясняющую полученные экспериментальные результаты. Большим успехом работы следует считать то, что теоретическая модель, построенная в диссертационной работе, описала РСА-изображения ураганов, недавно полученные со спутника Sentinel-1. Необходимо отметить вовлеченность диссертанта в описанные работы – он участвовал в большей части экспериментов и обработке массивов полученных данных, а также реализовал теоретические модели рассеяния, используемые в диссертации и алгоритмы обработки оптических изображений. Очень хорошее впечатление произвел доклад соискателя, сделанный им в июле 2024 г. в Морском гидрофизическом институте РАН (Севастополь).

Вопросы, замечания, рекомендации.

- Вопрос о фазовых скоростях ветровых волн заднего склона спектра в условиях сильно нелинейного волнового поля имеет давнюю историю. В семидесятые годы в ряде работ, выполненных в лабораторных и натуральных условиях, было обнаружено, что для таких волн нарушается дисперсионное соотношение, а именно, их фазовые скорости не зависят от частоты и близки к фазовой скорости волн спектрального пика [Ramamonjiarisoa 1974; Lake and Yuen, 1978; Ramamonjiarisoa and Giovanangeli, 1978]. Эти результаты интерпретировались, как следствие наличия связанных гармоник в существенно нелинейном поле волн. Аналогичное явление с

подобной интерпретацией описано и в данной диссертации. Однако в 1981 г. Оуэн Филлипс [J. Fluid Mech. 1981] рассмотрел теорию этих измерений и показал, что отклонения от дисперсионного соотношения на самом деле кажущиеся. Они обусловлены модуляцией коротких волн волнами спектрального пика. В связи с этим рекомендуем автору пересмотреть приведенные в работе результаты, касающиеся нарушения дисперсионного соотношения.

- Вопрос о скорости барашков на гребнях обрушивающихся волн также имеет давнюю историю и неоднократно поднимался в литературе. О. Филлипс при построении теории равновесного интервала [J. Fluid Mech. 1985] считал, что барашки, возникающие на гребнях обрушивающихся волн, движутся с фазовой скоростью этих волн. Скорость барашка входит в высокой степени в ряд формул, касающихся диссипации энергии при обрушениях, поэтому её величина представляет фундаментальную важность для теории явления. Мелвилл и Рапп [Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1990] в лабораторных условиях обнаружили, что барашек движется чуть медленнее несущей волны. С тех пор выполнено весьма большое число лабораторных и натуральных измерений школы института Скрипса, связанной с именем К. Мелвилла, где этот результат подтверждался. В то же время ряд работ Морского гидрофизического института (Севастополь), выполненных в натуральных условиях, показывает, что барашки движутся с фазовой скоростью обрушивающихся волн. Последние из работ МГИ примиряют эти две точки зрения, демонстрируя, что передний фронт барашка действительно имеет скорость несущей волны, в то время как расширение барашка по мере его распространения создаёт иллюзию его отставания от гребня. Результаты данной диссертации дают скорость барашка, на двадцать процентов превышающую скорость несущей волны. Это противоречит всем измерениям, проведенным как в лабораторных, так и в натуральных условиях в последние несколько десятилетий. Поэтому рекомендуем автору ещё раз внимательно рассмотреть свои данные и привести выводы их анализа в соответствие с известными и надежными научными представлениями. Игнорирование результатов по обрушениям ветровых волн, полученных в период с восьмидесятых годов до настоящего времени как школой Мелвилла, так и Морским гидрофизическим институтом, следует отнести к недостаткам диссертационной работы.

- Ряд вопросов вызывает анализ доплеровских спектров измеренного радиолокационного сигнала (п. 4.3). Для оценки спектров использована одна из составляющих комплексной амплитуды сигнала при том, что аппаратура, судя по её описанию, позволяет регистрировать обе компоненты. В результате спектры, представленные на рисунках 4.2-4.4, оказываются «свернутыми» относительно нулевой частоты, т. е. фактически анализируется модуль доплеровской скорости. Такой подход может привести к неточному определению максимумов спектра или их центров тяжести и соответствующим ошибкам в интерпретации результатов. Поэтому, для корректного сопоставления получаемых результатов с другими работами рекомендуется в дальнейших исследованиях придерживаться традиционного подхода в определении доплеровского спектра.

Необходимо подчеркнуть, что вышеуказанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы Русакова Н.С. и не умаляют её, важное научное и прикладное значение.

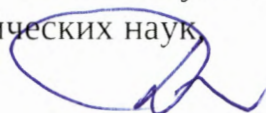
Заключение. Диссертация выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченный этап исследований по актуальной теме. Получены новые результаты, развивающие и углубляющие современные представления о механизмах, ответственных за рассеяние СВЧ-сигнала на водной поверхности при высоких скоростях ветра.

В диссертации имеются необходимые ссылки на авторов и источники заимствованных материалов, в том числе – на научные работы соискателя. Основные результаты, представленные в диссертации, опубликованы в рецензируемых научных изданиях, удовлетворяющих требованиям ВАК Российской Федерации.

Автореферат диссертации полностью отражает ее основное содержание. Диссертация полностью соответствует специальности 1.3.4 – «Радиофизика» и удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, а ее автор, Русаков Никита Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и утвержден на совместном заседании Общеинститутского научного семинара и семинара Отдела дистанционных методов исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН», протокол № 14 от 3 июля 2024 г.

Главный научный сотрудник
Отдела дистанционных методов исследований
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федеральный исследовательский центр
«Морской гидрофизический институт РАН»
доктор физико-математических наук



Дулов Владимир Александрович

Заведующий Лабораторией прикладной физики моря
Отдела дистанционных методов исследований
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федеральный исследовательский центр
«Морской гидрофизический институт РАН»
кандидат физико-математических наук,



Юровский Юрий Юрьевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Морской гидрофизический институт РАН» (ФГБУН ФИЦ МГИ)
299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
(8692)54-52-41, secretary@mhi-ras.ru

Подписи В.А. Дулова и Ю.Ю. Юровского заверяю.
Ученый секретарь Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Федеральный исследовательский центр
«Морской гидрофизический институт РАН»
кандидат физико-математических наук

Алексеев Дмитрий Владимирович

«03» июля 2024 г

