

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию обратного рассеяния на водной поверхности при сильных ветрах и построению полуэмпирической модели рассеяния с целью ее дальнейшего применения в методах восстановления скорости приводного ветра и ветровых напряжений на поверхности океана в штормовых и ураганых условиях по данным спутниковых радиолокационных измерений.

Актуальность темы работы обусловлена быстрым развитием мировой спутниковой наблюдательной системы (включая российский сегмент), широким использованием радиолокационных (РЛ) измерений для восстановления полей ветра, являющихся ключевым входным параметром в моделях динамики океана и атмосферы, и необходимостью развития РЛ методов восстановления скорости ветра и ветровых напряжений при ураганых условиях, точность которых в настоящее время крайне низка. В этой связи, проведение измерений обратного рассеяния на водной поверхности при сильных ветрах в контролируемых лабораторных условиях, и построение на основе этих измерений полу-эмпирических моделей, которые в дальнейшем могут быть использованы в методах/алгоритмах восстановления ветра по данным спутниковых измерений – исключительно актуально и важно.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются её цели и задачи, кратко излагается содержание диссертации.

Глава 1 является обзорной, в которой описаны методы восстановления поля скорости ветра по данным спутниковых пассивных и активных микроволновых измерений, дан обзор существующих геофизических модельных функций (ГМФ), описывающих рассеяние сигнала морской поверхностью в экстремальных условиях.

В Главе 2 приводится описание лабораторной установки «Высокоскоростной ветроволновой канал ИПФ РАН», используемой аппаратуры и методик измерений, в частности, - системы струнных волнографов, доплеровского скаттерометра X-диапазона и его калибровки.

В Главе 3 описываются результаты исследования характеристик атмосферного погранслоя, ветровых волн и обрушений в ветро-волновом канале при сильных ветрах. Приводятся зависимости коэффициента сопротивления и ветровых напряжений от скорости ветра, полученные на основе автоточности профиля «дефекта» скорости ветра в канале. Описываются общие характеристики ветровых волн, генерируемых при лабораторных

разгонах; представлены результаты исследования параметров «искусственно созданных» обрушений и обрушений ветровых волн, детектированных по оптическим изображениям. Предложены зависимости доли поверхности бассейна, покрытой обрушениями, от скорости ветра и динамической скорости ветра. Характеристики ветровых волн и обрушений необходимы для исследований особенностей РЛ рассеяния, рассматриваемых в последующих главах.

В Главе 4 приводятся результаты экспериментального исследования РЛ рассеяния в X-диапазоне на поверхности воды при сильном ветре. В разделе 4.2 представлены зависимости удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) на 4-х поляризациях (HH, VV, HV, VH) от динамической скорости ветра. Продемонстрировано насыщение УЭПР на ко-поляризациях и сохранение роста сигнала на кросс-поляризации при скоростях ветра превышающих 25-30 м/с. Анализ доплеровских спектров (раздел 4.3) показал, что скорость РЛ рассеивателей превышает фазовые скорости волн, что позволило предположить, что РЛ сигнал формируется на обрушающихся гребнях волн. Исследования РЛ рассеяния на искусственно сгенерированных обрушающихся волнах (раздел 4.4) показали, что мощность рассеянного сигнала определяется в основном площадью обрушения. На основании этого предложена эмпирическая зависимость, связывающая УЭПР на кросс-поляризации с долей поверхности, покрытой обрушением. В разделе 4.5 предложена параметризация доли обрушений в лабораторных условиях, которая далее используется в модели кросс-поляризационного РЛ рассеяния на обрушениях волн.

В Главе 5 предлагается композитная модель УЭПР на кросс-поляризации X-диапазона, которая учитывает вклад коротких ветровых волн и обрушений. Вклад коротких ветровых волн в УЭПР рассчитывался по упрощенной модели SSA-2 для измеренного волнения. Вклад обрушений в РЛ сигнал рассчитывался по измеренной доле поверхности, занятой обрушениями, и эмпирически полученной УЭПР барашка. Показано, что предложенная модель УЭПР хорошо соответствует измерениям в лабораторных условиях. Далее (раздел 5.3), предложенный подход перенесен на натурные условия путем использования иной параметризации доли поверхности, покрытой барашками, и иных представлений о спектре коротких волн. Модифицированная РЛ модель названа кросс-поляризационной ГМФ. Сопоставление предложенной ГМФ с данными Sentinel-1 PCA измерений на кросс-поляризации в С-диапазоне в области тропических циклонов продемонстрировало неплохое совпадение, что свидетельствует о возможности ее практического использования.

В Заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

На мой взгляд, основными результатами диссертации являются:

1. Подтверждение в контролируемых лабораторных условиях эффекта насыщения УЭПР обратного рассеяния радиоволн на ко-поляризациях и продолжающийся рост УЭПР на кросс-поляризации при ураганных ветрах, который был ранее обнаружен в натуральных условиях.
2. Экспериментальное подтверждение определяющей роли обрушений волн в формировании РЛ рассеяния на водной поверхности при сильных ветрах.

3. Количественные оценки УЭПР «индивидуальной» обрушающейся волны на кросс-поляризации, которые могут быть использованы в полу-эмпирических моделях рассеяния на морской поверхности.

4. Создание композитной РЛ модели кросс-поляризационного РЛ рассеяния на водной поверхности при сильных ветрах и ее верификация на данных лабораторных измерений.

5. Выяснение причин роста УЭПР на кросс-поляризации при возрастании скорости ветра, которые связаны с интенсификацией обрушений волн при сопутствующем насыщении спектра коротких брэгговских волн.

Все отмеченные результаты получены при непосредственном участии автора. Автор написал большую часть программного обеспечения, использованного при обработке волнографических и радиолокационных измерений, оптических изображений, а также программы для моделирования рассеяния на водной поверхности.

Работа производит очень хорошее впечатление и выполнена на высоком техническом и научном уровне. Тем не менее, при чтении работы возникает ряд вопросов и замечаний, которые перечислены ниже.

Замечания и вопросы

1. Обрушения волн приводят к всплескам обратного рассеяния на ко- (ВВ и ГГ) и кросс-поляризациях и вносят существенный вклад УЭПР морской поверхности. Это известный экспериментальный факт, который, в частности, подтвержден в данной работе (см. например рис. 4.9). Вначале рассматривается все комбинации поляризаций, однако начиная с раздела 4.4 (после рис. 4.9) результаты измерений на ВВ и ГГ поляризациях и их анализ неожиданно пропадают, что крайне неожиданно и не обосновано.

Известно, что ко- и кросс-поляризационное РЛ рассеяния на обрушениях исследовано крайне слабо, в первую очередь, - из-за недостатка данных измерений. В данной работе эти данные получены, но не представлены должным образом. Вопросы к РЛ рассеянию на ко-поляризации не меньше (если не больше), чем на кросс-поляризации, например: (а) каково поляризационное отношение (ГГ/ВВ) гребней обрушений; (б) какова экспериментальная оценка УЭПР индивидуального гребня на ко-поляризации; (в) если УЭПР на ВВ и ГГ насыщается при сильном ветре, то, значит ли это, что УЭПР барашка на ГГ и ВВ уменьшается со скоростью ветра (в отличие от кросс-пол, которое не зависит от ветра); (г) а если УЭПР уменьшается, то в чем физика, и в чем отличие от УЭПР на кросс-пол?

Я допускаю, что ответы на эти вопросы затруднительны и их обсуждение могло бы выйти за рамки диссертации, но продемонстрировать данные измерений на ГГ и ВВ было бы крайне желательно, по крайней мере, это бы стимулировало развитие новых идей.

2. В работе приводятся три различных выражения для доли поверхности покрытой обрушениями, q : (3.8) в Главе 3, (4.5) в Главе 4 и (5.11) в Главе 5. Первые два относятся к лабораторным измерениям и, по идее, должны иметь один и тот же вид, но это не так, показатель степени ветровой зависимости у них разный. Кроме этого, эти параметризации должны отражать специфические условия ограниченного разгона волн, в частности,

зависимость q от возраста волн, но этого нет. Третье выражение (5.11) появляется в Главе 5 для параметризации натуральных данных [114]. В отличие от первых двух, в этой параметризации учтена зависимость q от возраста волн. По логике, эту параметризацию следовало бы сопоставить с данными лабораторных измерений, где зависимость от возраста волн должна быть явно выражена, и предложить универсальную параметризацию, применимую для лабораторных и натуральных условий. Этого в работе не сделано. Соответственно результаты лабораторных исследований (в частности, по построению композитной модели) не могут быть очевидным образом экстраполированы на реальные условия.

3. Для моделирования кросс-пол рассеяния на ветровых волнах используется упрощенная версия SSA-2 модели [70-72], предложенная в [73], выражение (5.2). В качестве альтернативы, рассматривается также TSM (2х масштабная Брэгговская модель), заданная выражениями (5.3) и (5.4). На основании расчетов, приведенных на рис. 5.2, утверждается, что TSM значительно (в 5-10 раз) занижает УЭПР по сравнению с расчетами по SSA-2, и рекомендуется использовать SSA-2, а не TSM в расчетах по композитной модели. Это утверждение кажется спорным, требующим пере проверки.

Во-первых, в [71] показано, что при надлежащем выборе масштаба длинных волн, расчеты по SSA-2 и TSM примерно совпадают. Во-вторых, при малых наклонах поверхности и слабом изменении спектра кривизны в области брэгговских волн (условие упрощения модели SSA-2 в виде (5.2)), модель TSM в виде интеграла (5.3) с (5.4) дает выражение, которое аналогично упрощенной модели SSA-2 (см. например, (A1c) в работе Kudryavtsev et al., 2019, DOI: 10.1109/TGRS.2019.2920750). «Коэффициенты пропорциональности» в этих формулах имеют разный вид, но в рассматриваемых условиях имеют (по моим оценкам) примерно одни и те же численные значения.

4. В работе установлено, что обратное микроволновое рассеяние на гребнях обрушающихся волн дает доминирующий вклад в УЭПР водной поверхности на кросс-поляризации при сильных ветрах. Это безусловно важный результат, но следовало бы указать, что этот результат был получен ранее в реальных условиях при скоростях ветра до 20-25 м/с (Kudryavtsev et al., 2019, doi: 10.1109/TGRS.2019.2920750; 2014, doi:10.1002/2014JC010173), и сопоставить вклад обрушений в УЭПР поверхности в лабораторных и натуральных условиях.

5. В ГМФ (5.7) для описания рассеяния поверхности свободной от обрушений используется выражение для спектра волн в виде (5.8) (со ссылкой на работу [92]), которое не зависит от скорости ветра. Это выражение противоречит данным измерений, представленных на рис. 5.1. Кроме этого, данные натуральных измерений показывают явный рост спектра волн со скоростью ветра, за исключением, вероятно, условий ураганных ветров (см. например doi: 10.1109/TGRS.2019.2920750 и цитируемую там литературу). Идея использования (5.8) в ГМФ явно неудачна.

6. Предложенная в работе ГМФ неплохо соответствует данным РСА измерений в ураганах на кросс-поляризации, проанализированных при участии автора, рис 5.5. Однако, автору, очевидно, следовало бы провести сопоставление предложенной ГМФ с ГМФ, предложенными в других работах, например [Zhang&Perrie, 2012; doi:10.1175/BAMS-D-11-00001.1; Zhang et al., 2014, doi:10.1175/JTECH-D-13-00006.1; Mouche et al.,

doi:10.1109/TGRS.2017.2732508] и оценить достоинства/недостатки новой параметризации по сравнению с уже созданными.

Высказанные замечания не умаляют научной значимости работы и ни в коей мере не ставят под сомнение достоверность и новизну полученных результатов. Результаты работы Русакова Н. С. известны научной общественности, они хорошо представлены в научных статьях и докладывались на различных семинарах и конференциях. Некоторые результаты диссертации могут быть использованы для улучшения методов восстановления скорости ветра и ветровых напряжений на поверхности океана по спутниковым радиолокационным данным при ураганных ветрах.

Заключение по диссертационной работе.

Представленная диссертация Русакова Никиты Сергеевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой выполнены исследования, имеющие важное научное и прикладное значение, связанные с развитием спутниковых радиолокационных методов исследования поверхности океана при ураганных ветрах. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертационной работы.

Содержание работы и полученные научные результаты соответствуют паспорту научной специальности 1.3.4 – Радиофизика. Эти результаты опубликованы в 7 статьях в реферируемых журналах (которые включены в перечень ВАК).

Таким образом, можно заключить, что представленная диссертация «Исследование поляризационных характеристик рассеяния микроволнового излучения на поверхности воды в условиях штормового ветра» отвечает всем требованиям пунктов 9-11, 13-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, в редакции от 18.03.2023, а сам Никита Сергеевич Русаков заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Я, Кудрявцев Владимир Николаевич, даю согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

Официальный оппонент:

Доктор физико—математических наук,
Заведующий Лабораторией спутниковой океанографии
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Российский
государственный гидрометеорологический университет»

Кудрявцев Владимир Николаевич

Контактные данные:
195196, Россия, Санкт-Петербург,
Малоохтинский проспект, дом 98
Тел. 8(921) 912 47 11
e-mail: kudr@rshu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.04.12 – Геофизика (Физика моря)

«Подпись Кудрявцева Владимира Николаевича заверяю»



Леонтьев Д. В.

«09» сентября 2024 г

Проректор по развитию и научной работе
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Российский
государственный гидрометеорологический университет»