

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Вахида Чешм Сиахи на тему:
«Исследования ветровых волн в полярных и внетропических циклонах на основе спутниковых наблюдений и моделирования»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17. Океанология.

Диссертационная работа Вахида Чешм Сиахи посвящена полям поверхностных волн, порождаемым в океане внетропическими и полярными циклонами. Внетропические циклоны встречаются в северной части Атлантического океана более десяти раз в году и, имея ураганную силу ветра с высотой волн, достигающей 20 м., представляют опасность для судов, добывающих платформ и береговой инфраструктуры. Полярные циклоны, участвовавшие в связи с уменьшением ледяного покрова в Арктике, представляют непосредственный интерес для Российской Федерации и Северного морского пути. Оба вида этих атмосферных образований интенсивно генерируют ветровые волны. В зоне циклона волны могут иметь экстремальные характеристики, например, высоту 20 м во внетропических циклонах. Береговые зоны, которые находятся вне области циклона, тем не менее, оказываются под его воздействием в виде интенсивной зыби, распространяющейся от циклона. Таким образом тема работы актуальна с отчетливо выраженной направленностью на практические нужды человечества.

Используемые сегодня волновые модели WAVEWATCH III, WAM и SWAN в принципе могут быть применены и для расчета полей волн в экстремальных ветровых условиях. Однако, во-первых, это требует значительных компьютерных ресурсов. Во-вторых, вследствие чувствительности результатов к точности данных о поле ветра, качество расчетов оказывается невысоким, и потому требует учета ансамбля прогнозов, особенно в случаях быстро изменяющихся небольших полярных циклонов. Как результат, закономерности волновых полей, генерируемых внетропическими и полярными циклонами, как и их особенности, отражающие основные характеристики циклонов, остаются неясными. Поэтому результаты исследования этих закономерностей и особенностей, полученные в данной диссертации, несомненно, являются новыми и представляют, на мой взгляд, основную научную ценность этой работы.

Автор, вместо использования традиционных волновых моделей, положил в основу своей работы развитие двумерной параметрической модели, разработанной ранее Кудрявцевым с соавторами (2021). Использование этой модели и позволило ему осуществить громоздкие детальные расчеты для широкого набора характеристик внетропических и полярных циклонов и выполнить систематическое исследование закономерностей и особенностей волновых полей, генерируемых внетропическими и полярными циклонами. Важно, что при этом расчеты были подтверждены большим объемом спутниковых, в основном альтиметрических, данных, а также доступными контактными наблюдениями. Этот факт определяет достоверность полученных в диссертации выводов.

Работа состоит из Введения и трех глав. **Во Введении** стандартной структуры автором адекватно отражено современное состояние проблемы и дан исчерпывающий набор ссылок на предыдущие работы.

В первой главе детально описана двумерная параметрическая волновая модель В.Н. Кудрявцева с соавторами (2021), которая послужила основой модельных расчетов, проведенных в диссертации. Уравнения модели в одномерных вариантах дают известные законы развития волн для случаев ограниченных разгонов и времени развития волн. Автор выполняет модификацию параметров модели, чтобы сделать её пригодной для полярных областей с низкой температурой воздуха и атмосферных образований с экстремально сильным ветром со скоростями, превышающими 20-30 м/с. Далее описана процедура вычислений. Эта процедура нетривиальна, поскольку включает анализ большого набора волновых лучей с различными характеристиками, приходящими в каждый узел расчетной пространственно-временной сетки.

Вторая глава посвящена волнам в арктических морях. В главе анализируется генерация поверхностных волн под воздействием арктических вторжений холодного воздуха и полярных циклонов. В основе анализа лежат расчеты с помощью модифицированной автором модели, описанной в первой главе. В качестве входных параметров для моделирования волн использовались данные реанализа ERA5 о скорости ветра, температуре воздуха и стратификации атмосферы. Для оценки результатов моделирования использовались измерения спутниковых микроволновых альтиметров, а также данные визуальных наблюдений с платформы «Приразломная». В начале главы рассмотрены случаи холодных вторжений, для которых могли бы реализоваться классические законы развития волн от берега, но скорость ветра для рассмотренных случаев изменялась вдоль разгона волн. При этом модельные расчеты продемонстрировали согласие с данными альтиметров. Анализ показал, что закон развития энергии волн действительно наблюдается несмотря на непостоянство скорости ветра, если при переходе к безразмерным переменным использовать среднюю скорость ветра. В разделе 2.4 результаты расчетов с помощью двумерной модели сравниваются с данными наблюдений с нефтяной платформы «Приразломная», расположенной в Печорском море. Были рассмотрены волны, сгенерированные не только в Баренцевом и Печорском морях, но и пришедшие из Карского моря через пролив Карские Ворота. В точке расположения платформы самые высокие и длинные волны – это волны, развившиеся в Карском море. Пройдя через пролив Карские Ворота, они проявляются в Печорском море в виде «струи» интенсивных волн с максимально возможным разгоном. Наличие такой «струи» было подтверждено наблюдениями с платформы.

Основное внимание в главе 2 было уделено генерации волн полярными циклонами. Полярные циклоны в отличие от тропических являются мезомасштабными, короткоживущими и быстро движущимися, а также могут резко изменять направление своего движения. Согласно анализу автора, основанному на спутниковых данных, пространственное распределение скорости ветра в полярных циклонах иногда имеет радиальное распределение, как и в тропических циклонах, иногда же ветровое поле имеет значительную асимметрию и по форме напоминает запятую. Структура пространственного распределения высоты волн в полярных и тропических циклонах оказывается сопоставимой и имеет сильную азимутальную асимметрию. Волны, генерируемые движущимися полярными циклонами, имеют более высокую энергию и более развиты, чем при генерации неподвижным циклоном при тех же скорости ветра и размере циклона. Этот эффект аналогичен наблюдаемому при генерации волн

тропическим циклоном. Он соответствует «резонансу» скорости движущегося циклона и групповой скорости генерируемых им волн. Однако реализуется ли «резонанс» в полярном циклоне, зависит от расположения сектора максимальных скоростей ветра относительно направления скорости движения циклона. Если максимальные скорости ветра примерно ортогональны скорости циклона, «резонанс» не возникает.

Автор выполнил подробный анализ волновых полей двух полярных циклонов, движущихся сложным образом в течении периода их существования. Альтиметрические данные о высоте волн были рассмотрены на предмет их соответствия автомодельным решениям, описывающим разгон волн в области движущегося циклона, которые были предложены В.Н. Кудрявцевым с соавторами (2021) для описания волновых полей, генерируемых тропическими циклонами. Эти решения описывают стационарные поля в системе координат, связанной с движущимся циклоном, используя ключевое понятие «эффективного разгона». Автором обнаружено, что короткое время жизни полярного циклона и изменчивость его траектории не позволяют непосредственно применять концепцию эффективного разгона. Волны, генерируемые полярным циклоном за время его жизни, не достигают стационарного состояния, но развиваются со временем. Поэтому для их описания целесообразнее использовать концепцию эффективной продолжительности развития волн. Автор модифицировал автомодельные решения, введя в них эффективную продолжительность развития волн и на примере рассматриваемых данных показал, что в случае полярных циклонов понятие эффективной продолжительности развития волн имеет такое же физическое значение, как и понятие эффективного разгона в случае тропического циклона.

Третья глава посвящена исследованию волн во внетропических циклонах. Для внетропических циклонов, в отличие от тропических, характерно более широкое разнообразие форм и размеров, они не симметричны и имеют диаметр от 100 до более 1000 км. Кроме того, внетропические циклоны перемещаются со значительно более высокими скоростями. В главе были рассмотрены волновые поля двух внетропических циклонов. Для моделирования использовалась скорость ветра NCEP/CFSv2, а результаты расчетов сравнивались с данными спутниковых альтиметров. Кроме того, для сравнений были использованы данные о высоте волн, параметрах спектральных пиков и спектров волнения, полученные с китайско-французского океанического спутника для исследования и мониторинга поверхностных волн CFOSAT-SWIM. Первый из рассмотренных циклонов двигался со средней скоростью 19 м/с. На начальном этапе эволюции его радиус и максимальная скорость ветра равнялись 300 км и 20 м/с и, а наибольшие значения за время его жизни составили соответственно 500 км и около 31 м/с. Средняя скорость перемещения второго циклона равна 17 м/с, а максимальные значения его радиуса и максимальной скорости ветра составляют 700 км и около 40 м/с. Анализ данных в автомодельных переменных, предложенных Кудрявцевым с соавторами (2021), показал что ветровые волны, развивающиеся под воздействием рассматриваемых быстро движущихся внетропических циклонов, удобно рассматривать в терминах развития волн во времени. При общем описании волнового поля для быстро движущихся внетропических циклонов, как и для случаев полярных циклонов, понятие эффективного времени развития волн оказывается более подходящим, чем понятие эффективного разгона. Моделирование выявило следующие интересные особенности волновых полей.

После прекращения существования первого циклона порожденные им волны наблюдались в расчетной области в виде зыби ещё примерно сутки. На последнем этапе жизни второго циклона высоты и длины волн достигли соответственно 17 м и 500 м, приводя к исключительно опасному волнению в тыловом левом секторе на расстояниях от 300 км до 1200 км от центра циклона. То есть образовался огромный волновой фронт, весьма опасный для морского судоходства.

Расчеты волнового поля, сформировавшегося после преобразования второго циклона в струйный воздушный поток, выявили возникновение у побережья Гренландии волн с высотами и длинами, достигающими 18 м и 600 м, соответственно. Существование этих экстремально опасных волн было подтверждено спутниковыми данными. У южной оконечности Гренландии эти волны преобразовались в систему зыби, которая двигалась в направлении открытого океана с волновым фронтом, отчетливо наблюдаемым в спутниковых данных.

Исследование волн зыби показало, что их длины сохраняются вдоль траектории. Таким образом, было подтверждено, что распространение зыби подчиняется законам геометрической оптики. Однако наблюдающееся затухание энергии зыби оказалось обратно пропорциональным пройденному расстоянию. Такая скорость затухания значительно превышает оценки, полученные ранее другими исследователями. Автор объяснил это эффектом расходимости волновых лучей, вызванным начальной кривизной фронта зыби.

Результаты моделирования характеристик волн, генерируемых внетропическим циклоном, были сопоставлены с имеющимися спутниковыми данными. С этой целью было проведено сравнение результатов моделирования двумерной модели со всеми имеющимися данными измерений спутниковых альтиметров и CFOSAT-SWIM, охватывающих северную часть Атлантического океана за рассматриваемый период времени. Всего для проведения этого сравнения было использовано 130 треков альтиметров и 37 треков CFOSAT-SWIM. Результаты моделирования согласуются с измерениями на количественном уровне и модель в целом хорошо воспроизводит значения высоты, длины и направления волн в быстро меняющемся в пространстве и времени поле ветра. Дополнительная проверка достоверности результатов моделирования была выполнена также по контактными волновым измерениям. Были использованы временные ряды с ежечасными измерениями скорости ветра на высоте 1 м, высоты значительных волн и периода волн за промежутки времени с 12:00 11 февраля до 23:00 15 февраля 2020 г., полученные с буя, расположенного между Исландией и Ирландией. Сравнение результатов расчетов с контактными данными показало неплохое соответствие.

Замечания:

1. Автор широко использует двумерные гистограммы с цветовыми шкалами. Традиционно под гистограммами понимают графические представления одномерных распределений. Было бы хорошо для облегчения восприятия работы пояснить в начале рукописи, что такое двумерные гистограммы и как их интерпретировать.

2. К сожалению, рукопись порождает множество замечаний редакционного характера. Не останавливаясь на окончаниях и запятых (таких ошибок довольно много), отмечу досадные опечатки:

- Стр 31 «Здесь и далее мы связываем волновую энергию с дисперсией высоты морской поверхности, которая отличается от «истинной» энергии в g раз, где g – ускорение свободного падения.» - должно быть «в ρg раз, где g – ускорение свободного падения, ρ – плотность воды»

- Стр.33 ошибка в формуле в подписи к рис. 2.3

- Стр 85- «Анимация 3 (youtu.be/IowEimNeSY)» - неправильно указан адрес в Интернете

- Стр 87 «Диаграмма рассеяния на рисунке $\lambda_{рс}$ » - по-видимому, опечатка в номере рисунка

3. Не пояснено, откуда взяты константы в уравнении (3.3) (стр. 82)

4. Когда автор упоминает волны спектрального пика, слово «волны» он часто опускает, в результате возникают физически некорректные выражения, например, «смоделированными и измеренными направлениями спектральных пиков» (стр. 87), «фазовая скорость спектрального пика» (много раз), «групповая скорость спектрального пика» (много раз) и т.д.

5. Ряд заголовков подразделов не пронумерован (например на стр. 88, 90, 93).

Подчеркну, что приведенные замечания не носят принципиального характера.

Работа оставляет очень хорошее впечатление. Прежде всего, выделяется новизна подхода. Использование новой двумерной параметрической модели и автотельных решений кардинально упрощает анализ и прогноз волновых полей, порождаемых полярными и внетропическими циклонами. Во-вторых, впечатляет обилие всевозможных спутниковых данных, а также доступных контактных данных, использованных для подтверждения достоверности расчетов.

Работа ярко демонстрирует эффективность комбинированного использования различных типов данных для мониторинга экстремальных штормовых явлений и связанных с ними полей волн. Именно совместное использование мультисенсорных спутниковых и контактных измерений и моделирования может обеспечить детальное описание волнового поля, генерируемого циклонами различного типа, включая быстро движущиеся, причем как в зоне шторма, так и в районе системы зыби, распространяющейся в удаленные районы после прохождения и исчезновения внетропического циклона. В результате впервые были достоверно получены количественные характеристики распределения ветровых волн, генерируемых под воздействием полярных и внетропических циклонов и вторжений холодного воздуха. Работа содержит впечатляющие результаты, такие, например, как наличие «волновой струи» через Карские ворота, наличие фронтов интенсивной зыби, распространяющихся из областей циклонов, объяснение, почему в тыловой части внетропического циклона могут появляться волны с высотой 20 м и длиной 500 м. Она прекрасно иллюстрирована большим количеством рисунков и Анимациями 3,

4 и 5, выставленными в Интернет, которые облегчают понимание результатов работы и убедительно подтверждают выводы.

Заключение по диссертационной работе

Диссертация Вахида Чешм Сиахи является новым и важным вкладом в исследование волновых полей в условиях экстремально сильных ветров над океаном. Необходимо специально отметить важность этой работы для практических нужд – безопасности судоходства, нефтегазодобывающих платформ в океане, безопасности транспортного коридора Российской Федерации Северный морской путь. Рукопись хорошо иллюстрирована, список цитированных работ адекватно отражает современное состояние исследований. Работа хорошо апробирована, результаты опубликованы в высокорейтинговых изданиях.

Считаю, что диссертационная работа «Исследования ветровых волн в полярных и внетропических циклонах на основе спутниковых наблюдений и моделирования» удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Вахид Чешм Сиахи, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17. Океанология.

Диссертация ЧЕШМ СИАХИ ВАХИДА на тему: «Исследования ветровых волн в полярных и внетропических циклонах на основе спутниковых наблюдений и моделирования» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель ЧЕШМ СИАХИ ВАХИД заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.6.17 Океанология. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не установлены.

Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Член диссертационного совета
главный научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»,
(299011, г. Севастополь, ул. Капитанская 2),
+79780078496, dulov@mhi-ras.ru,
доктор физико-математических наук

Дулов Владимир Александрович

3 ноября 2023 г.

Подпись Дулова Владимира Александровича заверяю
Ученый секретарь ФГБУН ФИЦ МГИ
кандидат физико-математических наук



Д.В. Алексеев

3 ноября 2023 г.