

ОТЗЫВ

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

Полярные (ПЦ) и внетропические (ВТЦ) циклоны генерируют аномально высокие поверхностные волны и оказывают тем самым значительное влияние на безопасность судоходства, рыболовства, разработку природных ресурсов и развитие прибрежных районов. Мониторинг и прогнозирование параметров поверхностных волн, генерируемых специфическими атмосферными структурами, является важной научной и прикладной задачей. Поэтому тема работы **актуальна**, а её результаты имеют потенциально высокую практическую значимость.

Целью диссертационной работы является исследование особенностей генерации и эволюции поверхностных волн под влиянием движущихся циклонов и определение связи параметров генерируемых волн с характеристиками циклонов на основе спутниковых измерений и моделирования.

В качестве основного инструмента исследования волн использована двумерная параметрическая модель генерации и эволюции волн, предложенная ранее в работе (Kudryavtsev et al., 2021). В диссертационной работе, эта модель модифицирована для применения в Арктических условиях, характеризующихся низкими температурами воздуха, и для ее эффективного использования, разработана процедура вычислений, позволяющая получать поля волн на больших пространственных масштабах и длительностью до нескольких недель для реальных ежечасных полей ветра, предоставляемых данными реанализа ERA5 и NCEP.

Научная новизна результатов, полученная на основе применения этой модели совместно с данными спутниковых измерений состоит в: (а) установлении механизма генерации аномально высоких волн в ПЦ за счет эффекта «группового резонанса» волн с движущимся ПЦ; (б) описании особенностей генерации волн быстро-двигающимися ВТЦ, показывающим, что развитие волн начинается во фронтальном секторе циклона и заканчивается в правом тыловом секторе, где волны достигают максимального развития, определяемого скоростью ветра, радиусом и скоростью перемещения циклона; (в) описании эволюции волн, покидающих ВТЦ в виде зыби, и установление зависимости параметров волн (высота, длина) от удаления от штормовой области.

Научная и практическая значимость работы заключается в возможности использования двумерной параметрической модели для оперативной оценки опасных явлений, связанных с генерацией аномально высоких волн движущимися циклонами. Предложенные автомодельные законы развития волн, основанные на эффективном времени развития, могут быть использованы для «быстрой» оценки максимальных значений высоты волн и длины волны в условиях короткоживущих и быстродвигающихся ПЦ и ВТЦ. Полученные результаты могут быть использованы в системах раннего оповещения об опасных явлениях.

Достоверность полученных результатов подтверждается систематическим использованием спутниковых измерений для проверки модели и подтверждения модельных результатов об особенностях полей волн, генерируемых ПЦ и ВТЦ.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа состоит из Введения, трех глав, Заключения и списка литературы (103 источника), работа включает 45 рисунков и 2 таблицы.

Во Введении обосновывается актуальность темы, приводится обзор исследований по теме диссертации, формулируются цели и задачи исследования, приводится научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе диссертации рассматривается двумерная параметрическая волновая модель, предложенная в работе (Kudryavtsev et al., 2021), которая является основным «инструментом» исследования в работе. Одномерные варианты уравнений модели дают известные законы развития волн в случаях ограниченных разгонов и времени их развития. Особое внимание уделяется модификации параметров модели для учета воздействия холодного воздуха и неустойчивой стратификации атмосферы в Арктике на генерацию волн. В главе предлагается процедура расчета волн на основе решения системы уравнений, где в качестве входного параметра используются ежечасные поля ветра из данных реанализа ERA5 и/или NCEP. Решение задачи методом характеристик дает неоднозначное решение для параметров волн в заданной пространственной точке. Для преодоления этой проблемы, предлагается алгоритм поиска «оптимального» решения путем разбиения суперпозиции волновых лучей в данной пространственной точке на волновые системы. Этот вариант решения задачи был далее протестирован на данных спутниковых измерений.

Во второй главе исследуется генерация поверхностных волн под воздействием холодных вторжений в Арктике и полярных циклонов в Норвежском, Баренцевом и Карском морях. Рассмотрены две модели генерации волн: классическая автомодельная теория развития волн и двумерная параметрическая модель (2D-модель). Показано, что развитие волн при холодных вторжениях соответствует классическими законами развития волн с разгоном. Развитие волн в ПЦ существенно более сложное. Параметры генерируемых волн зависят от расположения штормовой области относительно направления движения циклона. Если она расположена в правом секторе ПЦ, то при генерации волн реализуется эффект «резонанса» между групповой скоростью генерируемых волн и скоростью перемещения ПЦ, типичный для волн в тропических циклонах. В этом случае высоты волн достигают аномальных больших значений по сравнению с «ожидаемыми» величинами, предсказываемых данной скоростью ветра и размером штормовой области. В отличие от тропических циклонов, ПЦ - это короткоживущие циклоны, существующие всего несколько часов или несколько дней. Поэтому подходы, разработанные для оценки волн в ТЦ и основанные на обобщении понятия «разгон», не могут быть применены для ПЦ. Предложен альтернативный подход, также основанный на классической теории подобия, но с использованием эффективного времени развития волн, которое зависит от скорости ветра, радиуса ПЦ, скорости его перемещения и продолжительности жизни ПЦ.

Моделирование волн в ПЦ с использованием модифицированной двумерной параметрической модели дает достаточно высокую степень согласованности с данными измерений альтиметров. Это говорит в пользу использования предложенной модели для быстрого оценивания и прогнозирования волн в арктических районах. Результаты исследования и данные измерений показывают, что в районе ПЦ могут наблюдаться аномально высокие волны с высотой до 12 метров, представляющие серьезную угрозу для судоходства и инженерных сооружений в арктических районах.

Третья глава посвящена исследованию генерации поверхностных волн быстро движущимися внетропическими циклонами (ВТЦ) в северной части Атлантического океана. Для этого используется комбинированный подход, использующий различные типы данных, включая мультисенсорные спутниковые наблюдения и контактные измерения, совместно с использованием одномерной и двумерной параметрическими моделями, основанными на принципах автомодельности.

Использование спутниковых данных и модельных расчетов позволило достаточно подробно описать пространственно-временную эволюцию полей поверхностных волн, генерируемых ВТЦ. Расчеты и наблюдения покрывали значительный период времени и выявили характерные особенности распределения волн в циклонах циклонов. Установлено, что генерация волн начинается во фронтальном секторе циклона. По мере развития, ветровые волны, групповая скорость которых меньше скорости перемещения, смещаются в направлении тыловой части ВТЦ, где достигают максимального развития. Высоты и длины волн на конечном этапе развития достигают значений, определяемых скоростью ветра, радиусом и скоростью перемещения циклона и временем его жизни. Сопоставление модели с данными спутниковых наблюдений показало хорошее соответствие, коэффициент корреляции между ними составил 0,87. Особое внимание уделено эволюции поверхностных волн, покидающих область генерации в ВТЦ. Получено, что длина волн зыби остается почти постоянной, а ее энергия затухает обратно пропорционально пройденному расстоянию.

На основе спутниковых наблюдений обнаружен эффект формирования аномально высоких волн (с высотами до 15м и длиной 500м) в зоне струйного воздушного потока вдоль побережья Гренландии, образующегося при распаде ВТЦ. У южной оконечности Гренландии, ветровые волны преобразуются в систему зыби,двигающейся на юг.

В **Заключении** представлены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Замечания по диссертационной работе:

Наиболее распространённый подход анализа и прогноза волн в океане основан на уравнении эволюции двумерного спектра волн в пространстве и времени. Адиабатическую версию такой модели можно считать достаточно точной, однако реальные волны сопровождаются физическими процессами (например, притоком энергии от ветра и обрушением). К сожалению, до сих пор эти процессы известны плохо, методы их параметризации вынужденно просты, так что даже при идеальном прогнозе поля ветра, ошибки прогноза волн остаются очень велики. К тому же, спектральные модели вынужденно используют довольно низкое частотное и угловое разрешение/

Сама по себе информация о спектре мало что говорит о реальных волнах, поэтому что детальная информация о них извлекается на основе различных модельных гипотез.

Значительного прогресса в развитии физических блоков спектральных моделей в обозримое время не ожидается, поскольку физические процессы преобразования энергии в волнах гораздо более трудны для исследования, чем сама механика нелинейных потенциальных волн.

Автор диссертации, следуя идеям своего руководителя, фактически отказался от формулировки проблемы в терминах первичных переменных и избрал путь, основанный на принципах подобия. Применительно к волнам этот подход основан на серьёзных эмпирических свидетельствах, показывающих, что при выборе соответствующих норм развитие волнового процесса становится близким к универсальному. Видимо, в основе этой закономерности лежит фундаментальный факт: полные адиабатические уравнения потенциального движения при нормировке с помощью энергии (SWH) и ускорения силы тяжести становятся полностью автомодельными, в том, смысле что все безразмерные характеристики, включая моменты высокого порядка и их статистические распределения в бесконечной или периодической области становятся универсальными, т.е. не зависят от полной энергии волнового поля. Реальные физические процессы, связанные с преобразованиями энергии, нарушают условия автомодельности, но подключение к параметрам скорости ветра удачно компенсирует неполноту формулировки, в результате чего возникают довольно надёжные связи между скоростью ветра, энергией и разгоном. В работах В.Н. Кудрявцева с сотрудниками показано что описание волновых процессов сводится к системе эволюционных уравнений, описывающих трансформацию характеристик спектра вдоль траектории распространения. Авторы стремились учесть многие известные эмпирические факты, что выражается искусным введением многих эмпирических констант. Полагаю, что в полной мере этот подход можно назвать эвристическим.

Суть представленной Ч.С. Вахидом работы состоит в том, чтобы применить эту конструкцию к описанию эволюции волнового поля, которое на самом деле формируется ансамблем траекторий с различными характеристиками. Распутывание этой паутины представляется очень трудной, (особенно в алгоритмическом смысле) задачей, требующей интуиции, изобретательности и не лишённой в определённой степени произвола. При этом, исходная модель была во многих отношениях подвергнута обоснованным уточнениям.

Не отвергая оригинальность и высокий научный уровень работы, хотелось бы сформулировать несколько вопросов, ответы на которые помогли бы уяснить место этого исследования в проблеме анализа и предсказания морских волн.

1. Изложение модели сопровождается многими сведениями и деталями, за которыми часто трудно следить в процессе чтения. Интересно понять, достигла ли модель уровня формализации при котором она может работать в автоматическом режиме подобно тому, как работают модели типа WAM или WAVEWATCH. Если этот уровень не достигнут, насколько трудно и возможно ли создать полностью автоматическую систему.
2. Понятно, что обычные спектральные модели (СП) в принципе описывают все процессы, рассматриваемые в данной модели. Главным чисто техническим недостатком СП, ставящим предложенную модель во многих отношениях выше, является низкое угловое разрешение СП, делающим очень неточным трактовку разгона. Приблизительные автомодельные

закономерности, подправляющие недостатки схем параметризации, можно было бы при желании вложить и в подробную спектральную модель (что конечно, противоречит красоте формулировки). Понятие разгона можно было бы детализировать введением трассеров для волновых пакетов.

Хотелось бы знать мнение диссертанта о сравнительной ценности обоих подходов, в какой степени они могут заменять или дополнять друг друга.

3. Сравнение полученных результатов с данными измерений продемонстрированное в работе, неизменно показывает хорошее или удовлетворительное согласование. однако не менее информативным был бы анализ (пусть редких) случаев полного отказа системы воспроизвести реальность. Для меня лично, как специалиста по математическому моделированию такая работа часто способствует устранению недостатков.

Заключения по диссертационной работе

В целом, считаю, что представлена очень хорошая работа, демонстрирующая глубокое и подробное понимание механики и физии волновых процессов, прекрасное знание литературных источников, высокую работоспособность и профессионализм автора. Прделана огромная и кропотливая работа по созданию функционирующей и фактически очень сложной модели, направленной на изучение и прогноз волновых условий в сложной гидрометеорологической обстановке.

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.

Член диссертационного совета:

Доктор физико-математических наук, профессор,
Главный научный сотрудник,
Лаборатории численных экспериментов по динамике океана
Санкт-Петербургского филиала ИО РАН

Дата 8 ноября 2023 г.

Чаликов Дмитрий Викторович

Подпись: Чаликов Д.В.
Заведующий лабораторией
Санкт-Петербургского филиала ИО РАН