

## 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

**Актуальность** диссертационной работы Чешм Сиахи Вахида обосновывается исследованием генерации поверхностных волн в полярных и внетропических циклонах (ПЦ и ВТЦ). Известно, что волны, генерируемые в этих условиях, могут быть аномально высокими и длинными. Особенно это важно для Арктики, где экстремально высокие волны, порождаемые ПЦ, могут представлять серьезную угрозу безопасности разработки природных ресурсов на континентальном шельфе, а также судоходству и транспортировке нефте- и газопродуктов. Ситуация также критична в Северной Атлантике, где ВТЦ с ураганскими ветрами создают экстремально высокие волны, влияющие на морскую деятельность, включая судоходство и рыболовство.

Спутниковые наблюдения, включая данные альтиметров, РСА и специальных радиолокационных волнографов, типа SWIM-CFOSAT, играют решающую роль в современном мониторинге поверхностных волн океана. Использование физически обоснованных моделей, требующих минимальных вычислительных ресурсов, параллельно с данными наблюдений позволяет создавать эффективные системы мониторинга и оповещения о потенциально опасных морских условиях в Арктике и Северной Атлантике. Это имеет решающее значение для безопасности судоходства и устойчивости морских экосистем.

**Основной целью** диссертации Чешм Сиахи В., является исследование генерации и эволюции поверхностных волн под воздействием полярных (ПЦ) и внетропических циклонов (ВТЦ), а также установление зависимости характеристик этих волн от различных параметров циклонов, таких как скорость ветра, скорость движения циклонов, их время жизни и радиус, типа азимутального распределения ветра (спираль, запятая), с помощью анализа спутниковых измерений и численного моделирования.

Для достижения поставленных целей автором были выполнены следующие задачи:

- (а) создание базы данных спутниковых и контактных измерений волн условиях ПЦ, ВТЦ и холодных вторжениях, дополненной полями ветра и иных метео-параметров;
- (б) исследование применимости автомодельных законов роста ветровых волн для анализа данных;
- (в) применение параметрической модели для моделирования волн, создаваемых "реальными" полями ветра на основе данных реанализов ERA5 и NCEP/CFSv2;
- (г) модификация модели для моделирования волн в арктических условиях и ее тестирование на спутниковых и контактных измерениях;
- (д) исследование распределения параметров волн в области движущихся полярных и внетропических циклонов в зависимости от их характеристик и типа азимутального распределения ветра;

(е) анализ эволюции параметров зыби, генерируемой ВТЦ, на основе моделирования и спутниковых наблюдений.

### **Научная новизна**

Научная новизна работы состоит (в первую очередь) в обобщении и применении двумерной параметрической модели для исследования пространственно-временного распределения поверхностных волн в арктических морях и в северной Атлантике. Моделирование выполнено с использованием полей ветра по данным реанализов ERA5 и NCEP, а также с учетом влияния низкой температуры воздуха и неустойчивой стратификации атмосферы в арктических морях на притоки энергии к волнам.

Кроме того, в рамках работы разработана эффективная процедура расчетов по модели, позволяющая получать ежечасные пространственно-временные поля волн на больших пространственных масштабах и длительностью до нескольких недель. Таким образом, работа содержит не только новые знания о волнах в арктических морях и северной Атлантике, но и предлагает инновационные инструменты для их моделирования и прогнозирования.

Также в работе применен синергетический подход, объединяющий моделирование и спутниковые измерения, благодаря которому были выявлены закономерности пространственного распределения волн в ПЦ и ВТЦ и установлена зависимость генерации волн от характеристик циклонов и типа азимутального распределения ветра. Полученные результаты позволяют более глубоко понять процессы генерации и эволюции волн в движущихся атмосферных образованиях.

Дополнительно, в работе получены автомодельные решения, основанные на концепции "эффективного времени развития", которые позволяют быстро оценить характеристики генерируемых волн. Это важно для оперативного прогнозирования параметров волн, учитывая движение циклонов и ограниченное время их жизни.

### **Научная и практическая значимость**

Работа Чешм Сиахи В. имеет высокую научную и практическую ценность. В ней предложен «набор модельных инструментов» (одномерные и двумерные параметрические модели) для быстрых оценок, расчетов и прогнозирования опасных волновых явления в Арктике и северной с высокой точностью и минимальными вычислительными ресурсами. Результаты работы могут быть использованы для повышения безопасности морского судоходства и функционирования нефтегазовых платформ в северной Атлантике и Арктике. Результаты работы использованы при выполнении научных проектов ЛСО и контракта с ГазПромНефть по обеспечению безопасности функционирования платформы Приразломная в Баренцевом море.

### **Степень достоверности**

Достоверность результатов диссертационной работы Чешм Сиахи В. подтверждается несколькими факторами:

1. Результаты были проверены путем сравнения с данными наблюдений.
2. Все расчеты и эксперименты были проведены на основе известных, общепринятых и многократно проверенных соотношений и теорий.

3. Основные результаты, полученные в рамках данной диссертации, были опубликованы в ведущих российских и международных рецензируемых журналах, а также успешно представлены на российских и международных конференциях.

Это подтверждает надежность и достоверность достигнутых результатов и выводов в данной диссертационной работе.

### **Структура и содержание работы**

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка из 103 наименований, 45 рисунков и 2 таблицы.

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость работы, а также изложены положения, выносимые на защиту; описана степень достоверности полученных результатов; приведены сведения о личном вкладе автора; приведены публикации (всего 6, из них 5 входят базы Scopus и Web of Science Researcher) и представлена апробация работы.

**Первая глава** посвящена описанию двумерной параметрической модели волн. Особое внимание уделяется модификации параметров этой модели, включая учет воздействия холодного воздуха, и неустойчивой стратификации атмосферы в Арктике на процесс образования волн. В рамках этой главы также рассматривается процедура разделения решения модели на различные системы волн- ветровые и зыби. Дополнительно, разрабатывается и детально описывается алгоритм расчета параметров волн, используя реальные данные о полях ветра из реанализов ERA5 и NCEP в качестве входных параметров.

**Во второй главе** подробно рассматривается развитие поверхностных волн, генерируемых арктическими вторжением холодного воздуха и полярными циклонами. Представляются две модели генерации волн, каждая из которых является уникальным вкладом в изучение этого явления. Первая модель основана на классических автомодельных теориях развития волн в пространстве и времени, а также на их применении к движущимся циклонам. Результаты подтверждают, что параметры волн, образующихся в результате вторжения холодного воздуха, соответствуют классическим автомодельным законам развития волн в пространстве. Анализ альтиметрических измерений волн в ПЦ показал, что эти законы, однако, не применимы для описания генерации волн в ПЦ. Предложена модификация автомодельных законов, основанная на концепции «эффективного времени», которая показала свою пригодность для описания волн в ПЦ.

Вторая используемая модель – это двумерная параметрическая модель развития волн. Приведенные в этой главе многочисленные расчеты волн и их сопоставление со спутниковыми измерениями, продемонстрировали высокую эффективность и достоверность модели. Наиболее интересным результатом главы является описание «эффекта захвата волн» движущимся ПЦ, и обнаруженный эффект зависимости высоты генерируемых волн от положения штормовой области относительно направления движения ПЦ. Обнаруженные автором и обоснованные теоретически значительные высоты волн генерируемых в ПЦ (до 12 метров), имеют значительную практическую ценность.

**Третья глава** диссертации представляет исследование поверхностных волн, генерируемых ВТЦ в северной части Атлантического океана. Работа показывает эффективность использования различных типов данных в сочетании с двумерной параметрической моделью для описания экстремальных волн. Анализ спутниковых

наблюдений показывает, что концепция эффективного разгона применима только при рассмотрении временных масштабов, превышающих продолжительность жизни рассматриваемых ВТЦ.

Модельные расчеты позволяют описать пространственно-временную эволюцию волн в области ВТЦ. Выявлено, что генерация волн начинается в переднем секторе ВТЦ. По мере развития волны смещаются к заднему сектору ВТЦ, где достигают максимальных высот. Наблюдаемые и обоснованные теоретически высоты волн, генерируемые в ВТЦ, достигают аномально высоких значений, до 22 метров. В заключительной стадии волны покидают область шторма, превращаясь в зыбь. Показано, что затухание энергии зыби обратно пропорционально пройденному расстоянию и объясняется эффектом расходимости волновых лучей. В целом, третья глава диссертации представляет важные результаты, которые дают значимый вклад в изучение поверхностных волн, генерируемых ВТЦ, и их пространственно-временной эволюции в северной части Атлантического океана.

**В заключении** представлены основные результаты работы и приводится обсуждение их возможного научного и практического применения.

#### **Замечания и недостатки диссертации**

- 1) Во введении на стр. 7 в первом пункте Основных положений, выносимых на защиту сказано: *«На основе анализа мультисенсорных спутниковых наблюдений установлены эмпирические закономерности пространственного распределения высот и длин ветровых волн в ПЦ и ВТЦ ...»*. Однако в результатах работы отсутствуют формулировки об установленных закономерностях распределения **длин** волн (однако, распределения **высот** волн подробно описаны).
- 2) В работе автор предлагает новую параметрическую волновую модель для исследования и прогноза волн в Арктике. Однако, известно, что в открытом доступе существуют расчеты полей волн по спектральным моделям третьего поколения WAVEWATCH III и WAM. Эти расчеты основаны на тех же полях ветра из реанализа ERA5 и ассимилируют данные спутниковых альтиметрических измерений. В этом контексте, волновые поля по моделям WAVEWATCH III и WAM можно рассматривать как "эталонные", с которыми автору следовало бы сравнить свои расчеты. Однако я не нашел в диссертации такого сравнения. Возникает вопрос - почему, а также чем представленные в диссертации результаты лучше расчетов по спектральным моделям?
- 3) Автор относит результаты описания распространения и затухания зыби из района шторма к «научной новизне». По моему мнению, здесь нет научной новизны, приведенные результаты представляет собой небольшую модификацию предыдущих результатов Kudryavtsev et al., (2021), Badulin & Zakharov (2017), Ardhuin et al. (2009), т.е. здесь нет ничего такого, что можно назвать «новизной».
- 4) На некоторых рисунках, таких как рис. 2.10, 3.13, 3.14 и 3.17, стрелки, обозначающие направление ветра и/или волн, имеют очень маленький размер, и их направления не понятны.
- 5) Текст содержит грамматические и стилистические ошибки. В некоторых фразах текста видно, что очевидно термины были напрямую переведены с английского на русский без тщательной адаптации, что приводит к неестественной форме на русском языке. В надписях и легендах большинства графиков автор использует лишь английский язык.

- 6) Отсутствует указание штормовой зоны ВТЦ на рисунке 3.1 (стр.66), которая была выбрана по эмпирическому порогу  $\max\left(0,45 u_m, 12 \frac{M}{c}\right)$ . При отсутствии этой информации затруднено визуальное определение ВТЦ на картах.
- 7) На стр. 93, комментируя рис 3.12b, автор говорит, что модель демонстрирует хорошую согласованность с данными измерений, потому что есть «высокая плотность точек». Непонятно, что автор имеет в виду. Возможно, «высокую плотность точек» в окрестности линии 1:1? Кроме того, концентрация точек вблизи линии 1:1 не обязательно свидетельствует о высокой эффективности модели, поскольку коэффициент корреляции, судя по рисунку, является незначимым.
- 8) На стр. 105 на рисунках 3.21с и 3.21е плохо различимы значения модулей волнового числа. Для читателей важно знать длины спектральных компонент волн, показанных на рисунке.

### Заключение

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертацию Чешм Сиахи Вахида на тему: **«Исследования ветровых волн в полярных и внетропических циклонах на основе спутниковых наблюдений и моделирования»**, можно считать законченной научно-исследовательской работой, выполненной автором на высоком научном уровне. Диссертация соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а 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 географических наук, профессор, профессор  
кафедры прикладной океанографии и комплексного  
управления прибрежными зонами РГГМУ



Малинин В.Н.

Дата 09.11.2023