



20 September 2023

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Бабанина Александра Владимировича 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

**Основной целью диссертации** Вахида. Чешм Сиахи является проведение исследований генерации и эволюции поверхностных волн под воздействием полярных (ПЦ) и внетропических (ВТЦ) циклонов, и установление зависимости характеристик волн от параметров циклонов (скорость ветра, скорость движения, время жизни и радиус) и типа азимутального распределения ветра (спираль, запятая) на основе анализа спутниковых измерений и моделирования.

### **Актуальность темы диссертации**

Исследования генерации и распространения ветровых волн, под действием ПЦ и ВТЦ являются актуальной темой современной океанографии, имеющей важные научные и практические приложения. В первую очередь это относится к Арктике, где аномально высокие волны, генерируемые внезапно возникающими и короткоживущими ПЦ, представляют реальную угрозу безопасности добычи природных ресурсов на шельфе, транспортировке нефте- и газо-продуктов, и навигации по интенсивно развивающемуся Северному Морскому Пути, а также - Северной Атлантике, где быстро двигающиеся ВТЦ с ураганскими ветрами порождают экстремально высокие волны (с высотами 20-25м) влияющими на морскую деятельность, включая судоходство и рыболовство.

Спутниковые наблюдения, такие как альтиметры и РСА, играют решающую роль в мониторинге и прогнозировании динамических процессов в верхнем слое океана, включая поверхностные волны. В настоящее время спутниковые наблюдения охватывают все полярные широты, что позволяет эффективно использовать спутниковые инструменты для всепогодного и круглогодичного мониторинга поверхности океана и волн в Арктике.

Более глубокое понимание особенностей генерации волн движущимися атмосферными системами, такие как ПЦ и ВТЦ, актуально, поскольку они слабо изучены и существенно отличаются от волн, генерируемых в условиях стационарных погодных систем. Разработка физически обоснованной и удобной для пользователя модели, требующей минимальных вычислительных ресурсов, является важным элементом в развитии оперативных систем раннего предупреждения об опасных явлениях.

### **Научная новизна**

Научной новизной исследования является обобщение и применение созданной ранее двумерной параметрической модели генерации и эволюции волн для исследования пространственно-временных полей поверхностных волн в арктических морях и в северной Атлантике.

Важнейшим элементом развития модели является использование реальных полей ветра по данным реанализов ERA5 и NCEP в качестве входного параметра модели, а также модификация

параметров модели для учета влияния низкой температуры воздуха и неустойчивой стратификации атмосферы в арктических морях на притоки энергии к волнам.

Разработана эффективная процедура расчетов по модели, позволяющая получать ежечасные пространственно-временные поля волн (ветровые волны и зыбь) на пространственных масштабах в тысячи км и временном протяжении - недели.

На основе синергетического подхода, объединяющего моделирование и спутниковые измерения, установлены закономерности пространственного распределения волн в ПЦ и ВТЦ, а также зависимость генерируемых волн от характеристик циклонов (скорость ветра, радиус, скорость движения) и типа азимутального распределения ветра (спираль, запятая).

Для «быстрой» оценки характеристик генерируемых волн, получены автомоделные решения, основанные на концепции "эффективного времени развития", учитывающей движение циклонов и ограниченное время их жизни.

К «научной новизне» могут быть также отнесены результаты исследования распространения зыби из области шторма и оценки скорости ее затухания, полученные на основе моделирования и спутниковых измерений.

### **Научная и практическая значимость**

Работа Чешм Сиахи В. имеет конкретные практические применения, направленные на обеспечение безопасности судоходства, добычи природных ресурсов с нефтегазовых платформ и функционирования береговой и прибрежной инфраструктуры в Атлантическом и Арктических районах. Особенно это важно в контексте увеличивающейся активности на Северном морском пути. Результаты исследования были проведены в рамках нескольких научных и коммерческих проектов Лаборатории спутниковой океанографии.

### **Степень достоверности**

Достоверность результатов исследования подтверждается путем сравнения численных экспериментов с данными наблюдений. Все полученные выводы базируются на хорошо известных, широко признанных и многократно проверенных законах и теориях. Основные результаты, полученные в процессе исследования, были опубликованы в ведущих российских и международных научных журналах и представлены на национальных и мировых научных конференциях.

### **Структура и объем диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованных источников из 103 наименования. В ней содержится 139 страниц с 45 рисунками и 2 таблицами.

### **Основные результаты, полученные в диссертации**

**Во введении** обоснована актуальность работы, поставлены цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, обоснованы методология и методы исследования, приведены научная новизна, научная и практическая значимость работы, описана степень достоверности полученных результатов, приведены сведения о личном вкладе автора, полный перечень публикаций по теме диссертации.

**В первой главе** описывается двумерная параметрическая модель волн. Особое внимание уделяется модификации параметров модели, в частности учету влияния холодного воздуха в Арктике на генерацию волн. Обсуждается процедура разделения решения модели на разные системы волн. Разрабатывается и описывается алгоритм расчета пространственно-временных полей волн с использованием реальных полей ветра по данным реанализов ERA5 и NCEP в качестве входных данных.

**Во второй главе** исследуется генерация ветровых волн в арктических морях на основе спутниковых альтиметрических измерений и моделирования. Анализируются особенности полей волн, генерируемых А) «стационарным» полем ветра (на примере холодных вторжений) и Б) существенно нестационарным и пространственно неоднородным полем ветра, ассоциируемым с полярными циклонами.

Показано, что в первом случае распределения волн описываются в рамках классической автомодельной теории развития волн (fetch laws), однако она не применима для оценки волн в ПЦ. Установлено, что во втором случае для оценки генерируемых волн более подходит автомодельная теория развития волн во времени, обобщенная на случай генерации волн в штормовой области заданного размера, которая перемещается в пространстве и имеет ограниченное время жизни. Эти автомодельные законы развития названы как extended duration laws (концепция эффективного времени развития волн).

Все приведенные и описанные случаи генерации волн в холодных вторжениях и ПЦ были промоделированы и проанализированы с использованием параметрической модели, и сопоставлены с данными измерений. Хорошее соответствие результатов модели с альтиметрическими измерениями доказало эффективность модели и ее модификаций для арктических условий.

Важным результатом этой статьи является обнаруженный эффект анизотропии поля ветра в ПЦ на генерируемые волны. Если ПЦ имеет форму запятой, то высоты генерируемых волн сильно зависят от того где расположена штормовая область: если в заднем секторе, то высоты волн имеют «обычные» значения, а если – в правом секторе, то высоты волн принимают аномально большие значения. Появление аномально высоких волн объясняется эффектом резонанса между групповой скоростью генерируемых волн и скоростью движения ПЦ.

**В третьей главе** представлено исследование основных характеристик поверхностных волн, генерируемых в северной Атлантики под воздействием быстро движущихся ВТЦ на основе мультисенсорных спутниковых наблюдений, контактных измерений и моделирования.

Приводится анализ пространственного распределения параметров волн (высота, длина волны, крутизна спектрального пика, возраста волн) вдоль сечений ВТЦ, на которых произведены спутниковые измерения. Установлено, что в быстро двигающихся ВТЦ генерация волн начинается в переднем секторе циклона, а волны по мере развития смещаются в сторону заднего сектора. При этом, в правой половине циклона направление ветра и скорости движения совпадают, поэтому волны здесь находятся под действием ветра дольше чем в левой половине. В результате, образуется экспериментально наблюдаемая асимметрия поля волн с максимальным развитием волн (более высокие и более длинные волны) в правом-заднем квадранте ВТЦ.

Анализ спутниковых измерений волн в области шторма ВТЦ показал, что, как и в случае ПЦ, эволюция волн подчиняется автомодельным законам развития во времени, которые необходимо модифицировать, чтоб учесть скорость движения ВТЦ и его радиус (extended duration laws). При достаточно большом времени жизни ВТЦ, развитие волн достигает стадии, типичной для fetch-law где в качестве масштаба разгона используется радиус ВТЦ.

Спутниковые измерения волн в ВТЦ а также измерения с океанических волновых буев промоделированы с использованием параметрической модели, использующей ежечасные поля ветра по данным реанализа NCEP в качестве входного параметра. В целом, модель вполне адекватно воспроизводит данные измерений, что свидетельствует о ее достоверности, и дает более детальное количественное описание особенностей генерации волн в ВТЦ.

Совместное использование спутниковых измерений и моделирование позволило проследить особенности эволюции волн зыби, образующейся после того как ветровые волны покидают штормовую зону ВТЦ. В частности оценен коэффициент затухания зыби, который обратно пропорционален удалению от зоны шторма. Как показал анализ, основным механизмом затухания является дивергенция волновых лучей зыби, связанная с искривлением линии фронта волн выходящих из штормовой области.

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

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

Несмотря на общий высокий уровень этой работы, необходимо отметить следующие замечания:

- 1) Общим недостатком работы является отсутствие обсуждения и оценки роли течений и льда на эволюцию волн, что особенно важно для рассматриваемого арктического региона.

- 2) Результаты 2D-параметрической модели не сопоставляются с результатами известных спектральных моделей, таких как WAVEWATCHIII, WAM. Это несколько удивительно, имея ввиду что расчеты полей волн по этим моделям общедоступны на соответствующих сайтах.
- 3) В работе отсутствует обсуждение преимуществ использования параметрической модели по сравнению со спектральными моделями WAVEWATCHIII, WAM.
- 4) В разделе 3.4.3, отмечается что «Наблюдаемое затухание энергии зыби,  $e \propto t^{-1}$ , происходит значительно быстрее, чем уменьшение энергии зыби вследствие диссипации в (Kudryavtsev и др., 2021a):  $e \propto t^{-1/2}$  за счет нелинейных волновых взаимодействий (Badulin & Zakharov, 2017):  $e \propto t^{-1/3}$ , а также в результате взаимодействием зыби с воздушным потоком в (Ardhuin и др., 2009)». Очевидно, что эти зависимости следовало бы также привести для сравнения на рисунке 3.19.

### **Заключение**

Диссертация Чешм Сиахи Вахида на тему: «Исследования ветровых волн в полярных и внетропических циклонах на основе спутниковых наблюдений и моделирования», соответствуют 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

Кандидат физико-математических наук (Ph.D),

Профессор Мельбурнского университета (University of Melbourne), Австралия (Australia)

Дата

Бабанин Александр Владимирович



**Alexander Babanin**

*Professor, Ocean Engineering*

*Adjunct Professor, Swinburne University of Technology*

*Director, Centre for Disaster Management and Public Safety (CDMPS)*