

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

Диссертация Чешм Сиахи Вахида посвящена актуальной проблеме динамики морского волнения в поле субарктических и внетропических циклонов. Характерные черты этих циклонов определяют быстрый рост ветрового волнения, генерируемого локальным ветром, и эффективную генерацию длинной зыби, способной распространяться на тысячи километров. Для моделирования волнения используется и развивается параметрическая модель, предложенная научным руководителем работы, проф. В.Н. Кудрявцевым. Верификация модели проведена для большого массива экспериментальных данных, включающего данные спутниковой альтиметрии, спутниковых РСА (радаров с синтезированной апертурой), инновационного спутника CFOSAT и данных волномерного бую. В ходе работы соискатель продемонстрировал высокий уровень компетенции в создании баз данных, оперировании этими данными для решения различных задач и анализе существенных физических эффектов, связанных с исследуемыми объектами.

Во Введении дается краткий обзор ранее выполненных исследований морского волнения в интенсивных циклонах и подчеркивается актуальность таких исследований для обеспечения безопасности морской деятельности. Исследования циклонов субарктических (полярных циклонов – ПЦ) и умеренных широт (внетропических, ВТЦ, по терминологии автора) представляют специальный интерес в связи с относительно малым временем их существования и характерными скоростями движения циклонов как целого. Последняя особенность может обеспечивать как рост эффективного разгона волн, так и захват волнового поля за счет группового синхронизма волн и поля ветра.

Цели работы формулируются с учетом описанных особенностей. Предлагается комплексный подход, включающий создание баз данных, анализ этих данных и моделирование морского волнения в рамках оригинальной параметрической модели.

Положения, выносимые на защиту, сформулированы в виде шести пунктов, центральным из которых является п.5, детализированный в трех частных практически значимых результатах.

Материалы и методы, использованные в работе, описаны, на взгляд оппонента, излишне кратко. Центральным пунктом является сравнение результатов параметрической модели с данными измерений и реанализов.

Использование модификации параметрической волновой модели для ПЦ и ВТЦ определяет **новизну работы**. Модификация связана с адаптацией параметров взаимодействия волн с ветром путем изменения коэффициента сопротивления. При этом ключевые параметры автотельности, показатели степенных зависимостей энергии и

периода волнения от времени (разгона), полагаются постоянными. На взгляд оппонента, этот аспект возможной модификации недостаточно освещен в работе.

Научная и практическая значимость работы не вызывает сомнений. Соискателем проведен детальный анализ результатов моделирования и возникающих физических эффектов, что может служить основой для уточнения физических представлений о динамике волнения в циклонах. Практическое значение очевидно в контексте проблем безопасности морской деятельности.

Достоверность результатов подкреплена достаточным числом публикаций в рецензируемых журналах и выступлениях на научных мероприятиях.

В Главе 1 Двумерная параметрическая модель волн представлен математический аппарат, на котором базируется дальнейшее исследование. Эта модель была предложена в серии работ Kudryavtsev, Yurovskaya, Chapron (2021a,b) и показала довольно высокое качество прогноза волнения в тропических циклонах (Yurovskaya, Kudryavtsev, Chapron 2023). Ниже цитаты даются по тексту диссертации. Модель существенным образом использует полуэмпирический закон роста волнения Тоба (1972). В то же время, общее выражение для показателей p , q степенных зависимостей высоты и периода волнения (ур-е 19 Kudryavtsev, Yurovskaya, Chapron 2021a) получено последовательным анализом свойств автомодельности кинетического уравнения для волн на воде, так называемого уравнения Хассельманна (ур-я 1a,b Kudryavtsev, Yurovskaya, Chapron 2021a). Сама процедура вывода уравнений модели использует подходы ранее рассмотренных моделей узконаправленного приближения (Заславский М.М. Об узконаправленном приближении кинетического уравнения для спектра ветровых волн. Изв. РАН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989 т.25, N4) и так называемой split balance model (Badulin S. I., Pushkarev A. N., Resio D., Zakharov V. E. Self-similarity of wind-driven seas // Nonl. Proc. Geophys. 2005. Vol. 12. Pp. 891-946). Эти статьи в диссертации не упоминаются. Следует также обратить внимание на цитируемую в диссертации статью Hasselmann et al. 1976, в которой также предложена параметрическая модель волнения. В этой статье получены автомодельные решения для $p=1$, $q=3/10$. В статье Захаров В. Е., Заславский М. М. Зависимость параметров волн от скорости ветра, продолжительности его действия и разгона в слаботурбулентной теории ветровых волн // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1983. Т. 19. № 4. С. 406–416 (не цитируется) предлагаются другие показатели роста $p=4/7$, $q=3/14$. Все упомянутые частные решения идеализированной автомодельной задачи роста волнения обобщены С.И. Бадулиным с соавторами как своеобразная азбука ветрового волнения (Gagnaire-Renou, E., Benoit, M., and Badulin, S. I.: On weakly turbulent scaling of wind sea in simulations of fetch-limited growth, J. Fluid Mech., 669, 178–213, 2011; Бадулин С.И. Азбука ветрового волнения. В сборнике: Нелинейные волны' 2018. Отв.ред.: А. Г. Литвак, А. В. Слюняев. 2019. С. 121-141). Разные показатели автомодельного роста отвечают стадиям роста от молодого быстрорастущего ($p=1$, $q=3/10$) через режим стационарного потока энергии (режим Тобы $p=3/4$, $q=1/4$) к стадии перехода к зыби ($p=4/7$, $q=3/14$).

Соискатель уходит от детального анализа свойств автомодельных решений в направлении построения более простой модели, где показатели роста фиксирована, а необходимая настройка производится с помощью других параметров, прежде всего, характеристик

взаимодействия волн с ветром: коэффициента сопротивления и плотности воздуха. Последнее оказывается значимым именно в низкотемпературных условиях полярных циклонов. Такое упрощение модели и связанного с этим описания динамики волнения оказывается оправданным в дальнейшем, поскольку позволяет удовлетворительно описать многие черты наблюдаемых явлений.

Определенную критику может спровоцировать раздел **1.4 Процедура расчетов**. Параметрическая модель оперирует системой обыкновенных дифференциальных уравнений (1.1-1.4), что создает серьезные проблемы при постановке начальных и граничных условий. В процессе решения этих уравнения может возникать (и возникает) проблема неоднозначности решений, когда в точку фазового пространства приходит более одного луча (т.н. каустика). Обычно проблема решается введением, в той или иной форме, диффузии. В рассматриваемой работе выбор «истинного» решения производится с помощью селекции волновых систем (лучей, семейств решений). Критерии такого отбора вводятся автором на основе массивов численных экспериментов. В целом, предлагаемый подход, несмотря на его спорность и математическую небезупречность оказывается эффективным и приводит к достоверным физическим результатам.

В Главе 2 Волны в арктических морях параметрическая модель использована для моделирования конкретных ситуаций, связанных с интенсивными полярными циклонами (ПЦ) в Карском и Баренцевом морях (раздел 2.1). Наиболее ценным результатом, на взгляд оппонента, является убедительная демонстрация различий исходной и модифицированной моделей. По высоте волнения различия могут достигать десятков процентов. Тем не менее, в следующем разделе 2.2 подчеркивается ограниченность модели, оперирующей понятиями идеализированной постановки для стационарного либо пространственно-однородного сценариев развития волнения. При интерпретации результатов автору приходится «переключаться» на пространственно-однородную постановку, чтобы объяснить наблюдаемые отличия. Здесь оппонент вынужден вернуться к критике предыдущей главы и своему предложению включить в модель зависимость скорости развития волнения (показатели p , q) от его возраста. Некоторые соображения по развитию параметрических моделей высказаны в разделе 2.3, хотя и в не очень ясной форме. Следует отметить и ограниченные возможности предлагаемой автором модификации модели, что иллюстрируется рисунками 2.1. и 2.2. Во втором случае холодного вторжения оригинальная модель в основном недооценивает высоты волнения, тогда как модифицированная переоценивает на сопоставимую величину.

В разделе 2.4 автор сравнивает результаты моделирования волнения с измерениями на платформе «Приразломная». Соискателю удалось справиться с многочисленными сложностями анализа и интерпретации визуальных данных (соответствие баллов и величин скорости ветра и высоты волнения) и особенностей данных реанализа (эффект затененности места измерений из-за струйности ветрового потока).

Раздел 2.5.1 посвящен исключительно интересному явлению, обнаруженному при моделировании ПЦ №1. Фактически, речь идет о возможности максимального проявления эффекта увеличенного разгона (extended fetch) в случае близости собственной скорости циклона и характерной групповой скорости волн (группового резонанса), своеобразного захвата поля волнения циклоном. Оппонента в этом обсуждении смущают ссылки на так

называемое насыщенное волнение, когда величины высот волнения оказываются жестко связанными со скоростью ветра. Сама концепция состояния насыщенного волнения весьма спорна (e.g. J.G.M. Alves and M.L. Banner Revisiting the Pierson–Moskowitz Asymptotic Limits for Fully Developed Wind Waves, V.33 J. Phys.Oceanography, 2003). Эти величины могут быть использованы в качестве референтных только в качестве самого грубого первого приближения. В тексте следовало бы оговорить ограниченность применяемого подхода.

В разделе 2.5.2 и далее широко используется термин «волновые пакеты», с которым оппонент категорически не согласен. Обычно под волновыми пакетами понимают локализованные в пространстве и времени волновые возмущения, чья динамика анализируется в рамках фазо-разрешающих волновых моделей. Система лучевых уравнений (1.1-1.4) получена для средних по спектру характеристик волнового поля и не содержит фазовой информации. Правильнее было бы говорить о системах волн, распространяющихся вдоль лучей, задаваемых их средними параметрами (частотами, направлениями). Таким образом, в разделе обсуждается актуальнейшая проблема динамики смешанного морского волнения, хотя последний термин в тексте отсутствует.

В разделе 2.5.4 анализируется структура смешанного волнения (системы волновых пакетов по терминологии автора). Основным критерием выделения ветрового волнения оказывается зависимость роста типа закона Тобы (закон $3/2$). Оппонент категорически не согласен с утверждением автора, что из самой этой интегральной зависимости следует зависимость частотного спектра ω^{-4} . Формула в последней строке первого абзаца на стр.56 неверна, поскольку интегральная энергия e не зависит от частоты. Спектр ω^{-4} является точным решением кинетического уравнения для волн на воде, так называемым спектром Колмогорова-Захарова для прямого каскада энергии и реализуется в широчайшем диапазоне физических условий, практически вне зависимости от параметров роста волнения.

В целом, Глава 2 убедительно демонстрирует успешность модифицированной модели формирования волнового поля в циклонах, развиваемую соискателем.

Глава 3 Волны во внутритропических циклонах рассматривает, на первый взгляд, более удобную для развиваемой модели ситуацию, когда циклон имеет достаточно большие размеры в сравнении с ПЦ. Однако, как показывают исследования, особенности внутренней структуры ВТЦ приводят к формированию фронтов интенсивной зыби и необходимости прогноза их параметров в целях безопасности морской деятельности.

Методика моделирования и верификации результатов во многом повторяет подходы Главы 2: использованы данные реанализа и альтиметрии. В дополнение к этому, анализируются данные французско-китайского спутника CFOSAT и радаров с синтезированной апертурой (РСА), что оправдано в ситуации довольно длинной зыби (200 и более метров) и относительно больших размеров самих циклонов. Прибор SWIM CFOSAT и РСА позволяют оценить волновые спектры и интегральные характеристики, направление, высоту и среднюю длину волны.

На рис.3.5, 3.6 (третья колонка) автор вновь дает критерий Pierson-Moskowitz (1964) насыщенного волнения, подвергшийся критике выше. Спорность такого критерия, на

взгляд оппонента, замечательно иллюстрируется рис.3.7, данного в размерной форме. Более удачной, хотя и по-прежнему спорной, представляется формулировка критерия насыщенного волнения в терминах средней крутизны волнения. Тогда безразмерный множитель (т.н. константа Филлипса) в аппроксимации спектра типа Пирсона-Московица есть квадрат крутизны, который формально не зависит от скорости ветра. Введенная в работе на стр.76 крутизна вычисляется для «насыщенной» длины волнения и в 2 раза выше стандартно определяемой через среднеквадратичную высоту волнения.

В разделе 3.3 полученные данные интерпретируются в рамках теории автомодельного развития волнения с учетом эффекта увеличения эффективного разгона в поле движущегося циклона. Показано, что для ВТЦ идеализированная модель развития волнения со временем (duration-limited setup) обеспечивает удовлетворительное количественное согласие с результатами наблюдений (см. Рис.3.11).

В разделе 3.4 подробно описаны методика и результаты моделирования волнения в ВТЦ. Результаты иллюстрируются большим количеством рисунков и анимаций, которые наглядно показывают формирование фронта зыби, генерируемой движущимся ВТЦ. Некоторые иллюстрации содержат небрежности обработки данных. Так спектральные распределения на рис.3.18 и 3.23, полученные для SWIM, не являются симметричными. Для масштабированных спектров энергии во второй колонке этих рисунков следовало бы показать наклоны спектров. Отличия от спектра JONSWAP ω^{-4} (спектра Тобы, спектра Колмогорова-Захарова) кажутся оппоненту значительными и нуждаются в объяснении.

Существенным результатом работы являются данные о пространственном затухании зыби. Ранее такое затухание аппроксимировалось экспоненциальной зависимостью с характерным масштабом около 8000 км (затухание в e раз), превышающим существенно (в 4 раза) полученный в работе 2000 км. Ранее такое сильное затухание зыби не обсуждалось. Важно, что автор настаивает на степенном законе затухания, сравнивая свои результаты с другими работами. Степенная аппроксимация более адекватна с точки зрения статистического описания волнения (уравнения Хассельманна). Цитирование работы Badulin & Zakharov (2017) не вполне корректно. Во-первых, степень $-1/3$ указана неверно, во-вторых, в цитируемой работе отсутствует эффект сферической расходимости.

Сравнение с данными волномерного буя подтвердило наблюдение выраженного фронта зыби в развиваемой модели и более слабый эффект в снимках РСА. В данных буя фронт фиксируется как заметное отставание максимальной высоты волнения относительно максимальной скорости ветра.

В **Заключении** сформулированы результаты работы. Следует отметить, что обсуждение этих результатов проведено в заключительных разделах каждой из глав, что оправдывает кажущуюся краткость Заключения.

Работа хорошо структурирована, написана понятным языком. Соискатель показал свою высокую квалификацию при работе с данными разных типов: дистанционных, контактных измерений, базами данных реанализа и т.п.. Хорошее владение современным состоянием исследований позволило предложить убедительные схемы физической интерпретации полученных результатов. Многочисленные замечания, высказанные оппонентом, во многих случаях следует рассматривать как указания на возможности профессионального

роста и развитие работы в направлении, на котором уже получены существенные научные результаты.

Незначительные погрешности в русском языке могут указывать как на отличные способности соискателя к изучению языков, так и на его способности устанавливать и поддерживать добрые взаимовыгодные отношения с коллегами. В том и другом случае это является полезным качеством начинающего исследователя.

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
д.ф.м.н., гл.н.с, рук. Лаборатории
нелинейных волновых процессов
ФГБУН Института океанологии им.П.П. Ширшова РАН,
117997, г. Москва, Нахимовский пр. 36
Tel: +7(499) 124-7565; e-mail: badulin.si@ocean.ru;
<http://www.ocean.ru>

С.И. Бадулин

24 октября 2023 г.



Верно

Зав. канцелярией ИО РАН

Умбелова СВ