

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу

Пиваева Павла Дмитриевича

«Реакция океана на прохождение тропических циклонов по данным спутниковых наблюдений и моделирования»,

представленную на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 1.6.17. Океанология

Диссертация Павла Дмитриевича Пиваева «Реакция океана на прохождение тропических циклонов по данным спутниковых наблюдений и моделирования» посвящена активно развиваемой в последнее время теме тропических циклонов (ТЦ). Эта работа явно выделяется из общего потока своей ориентацией на исследование физических механизмов взаимодействия ТЦ с океаном и широтой рассмотрения различных аспектов этого взаимодействия. Следует также отметить разнообразие использованных исследовательских подходов: аналитических, численных и методов статистического анализа данных. По мнению оппонента, соискатель успешно выполнил задачи, поставленные его научным руководителем, и обеспечил солидный задел для дальнейшей работы по избранному направлению.

Во Введении даны основные сведения о диссертационной работе и ответы на формальные вопросы об **актуальности, научной новизне, степени личного участия** и т.п. Положения, выносимые на защиту, сформулированы в крайне неудачной, на взгляд оппонента, форме безличных предложений. Отрицательное впечатление несколько смягчается развернутым представлением задач, методов и новизны исследования. Уже во Введении подчеркивается такая важная часть работы как оценка ошибок, связанных с обработкой данных и численным моделированием. Списки публикаций, участия в научных мероприятиях, программах и проектах свидетельствуют об активности и продуктивности соискателя.

Работа состоит из четырёх разделов, содержит большое количество высококачественных иллюстраций. Каждый раздел сопровождается выводами и

кратким обсуждением. Общее Заключение оформлено как список основных защищаемых результатов с краткими комментариями. Основной материал сопровождается списком сокращений и условных обозначений и приложениями, в которых приведены детали использованного математического аппарата. Список литературы содержит 168 названий.

В первом разделе «Реакция уровня океана на ТЦ» рассматривается задача об установлении уровня поверхности океана под воздействием внешней силы, связанной с напряжением трения ветра. Используется приближение линейных волн для баротропных (поверхностных) и бароклинных (инерционно-гравитационных) волновых возмущений, которые стационарны в системе отсчета, связанной с прямолинейно и равномерно движущимся ТЦ. Следует обратить внимание на полную аналогию такой постановки с классической задачей лорда Кельвина о корабельных волнах (Thomson, W.: On ship waves. Proc. Inst. Mech. Engrs. 38, 409–434, 1887). Развитый физический анализ этой задачи для различных типов волн в задачах геофизической гидродинамики можно найти в обзоре П.Н. Свиркунова и М.В. Калашника в Успехах физических наук (DOI: 10.3367/UFNr.0184.201401d.0089). Представляется, что ряд выводов о поведении поверхности под воздействием ТЦ мог бы быть сделан без обращения к численным решениям, представленным на рисунках 1.2, 1.10-1.12, а исключительно на основе анализа кинематики волн (в первую очередь соотношения между скоростью перемещения ТЦ и скоростями волн, фазовой и групповой). В некоторых случаях видны проблемы, связанные с численным интегрированием быстроосциллирующих функций (пример, рис.1.11б).

В целом, следует отметить детальность выполненного анализа и важный вывод о необходимости учета небольшого числа бароклинных мод для моделирования возмущения, связанного с ТЦ. Этот вывод существенно использован в последующих разделах.

Результаты теоретического и численного анализа раздела сопровождаются анализом данных спутниковой альтиметрии. Следует отметить этот заслуживающий похвалы подход автора, используемый всюду в работе:

результаты физического и численного анализа, полученные с использованием многочисленных приближений и гипотез, всегда сопровождаются сравнением с имеющимися данными измерений.

Результаты раздела опубликованы в двух статьях в *Physical Oceanography* и *Ocean Modelling*.

Изложение материала раздела не лишено недостатков.

1.1. Сравнение результатов физического анализа с данными измерений порой переходит в чрезмерную многословность. При этом анализ иногда представляется незавершенным при том, что материал для завершения явно имеется. В качестве примера можно рассмотреть рис.1.5, показывающий соотношение между частотой плавучести и толщиной сезонного пикноклина. Показателен, на взгляд оппонента, был бы график в координатах $d - N^2 d$, что позволило бы частично уйти от региональных различий и, фактически рассмотреть понятную физическую характеристику, дефицит плотности $N^2 d$. Это кажется важным, поскольку развиваемая модель, фактически, оперирует интегральными характеристиками верхнего слоя океана. Кроме того, универсальное (независящее от региона) поведение зависимости могло бы послужить косвенным указанием на физическую корректность введения самого понятия «толщина сезонного пикноклина» и возможность использования модели в других районах Мирового океана.

1.2. В тексте диссертации автор излишне детализировал методы анализа, использованные в статьях. При этом были допущены досадные неточности. Исходные уравнения (1.1) записаны для вращающейся жидкости, однако, соответствующая краевая задача (1.8) параметра Кориолиса почему-то не содержит. В (1.14) в левой части скаляр, в правой - вектор. По-видимому, пропущен индекс компоненты этого вектора.

Второй раздел «Проявление ТЦ в доплеровской скорости океана» логично развивает результаты предыдущей части. Поле скорости оказывается более информативной характеристикой следа ТЦ, чем волновые возмущения поверхности. Помимо относительно крупномасштабной части, связанной с

баротропными и бароклинными возмущениями, геострофическими течениями, вклад в сигнал спутникового доплеровского измерителя вносят ветровые волны и связанные с ними рябь, пена и т.п.. Последние могут служить как предметом исследований, так и своеобразными маркерами, позволяющими оценить динамику течений. Для моделирования морского волнения в ТЦ использована модель ветрового волнения TC-DOP, развитая в серии работ В.Н. Кудрявцева с соавторами (ссылки 114-116 списка литературы). Автор участвовал в работе по развитию этой модели (статья в Remote Sensing, 99 из списка). Чрезвычайно важным результатом этой работы, на взгляд оппонента, является экспериментально показанная сильная зависимость диссипации волнения от крутизны (крутизна в шестой степени). В работе [98] и в диссертации утверждается, что это согласуется с функцией диссипации в модели WAM. На самом деле, зависимости, используемые в большинстве моделей волнения гораздо слабее зависят от крутизны, в модели WAM и WaveWatch рекомендуется степень 4. В работах В.Е. Захарова с соавторами указывается на пороговый характер диссипации. Соответствующая степенная зависимость отвечает гораздо более высоким показателям (см. DOI:10.1063/1.3241292 и ссылки в ней). Оппонент оценивает этот результат очень высоко, несмотря на то, что он не связан непосредственно с темой диссертации.

Расчеты для модельных распределений и спутниковых данных РСА показали сложную структуру поверхностных течений, формируемых ТЦ и выявили ряд сложностей настройки моделей, прежде всего, необходимость уточнения параметра сопротивления морской поверхности при больших скоростях ветра.

Еще одним важным результатом, можно считать зафиксированные проявления течений, связанных с инерционными колебаниями. Это представляет огромный интерес в связи с известными трудностями наблюдений инерционных волн в океане.

Третий раздел «Термическая реакция океана на ТЦ» развивает параметрическую модель трехмерной динамики перемешанного слоя океана

(ПС) под воздействием ТЦ. Раздел открывается представлением фрагментов модели. Отдельно представлен блок адвекции температуры (раздел 3.2.1). Эффективным и физически корректным в рамках простейшей модели представляется переход от температуры слоя океана к температуре поверхности с помощью интегрального соотношения (ур-я 3.8-3.10). Следующие разделы описывают методику применения полученных простых соотношений к обработке синтетической базы данных MAXSS о поверхности температуры океана. Особенность методики состоит в интерполяции данных на нерегулярную сетку, привязанную к перпендикулярам к траектории движения ТЦ.

Некоторые фрагменты раздела вызвали у оппонента вопросы.

3.1. Из текста (стр.83 выше ф.3.12) неясно, почему автор пошел на такое усложнение вместо рутинной обработки данных на регулярной сетке.

3.2. Неудачной представляется терминология, когда минимальной аномалией называются максимальные отклонения температуры от фоновых значений.

3.3. На стр.88 формула 3.13 определяет параметр Δ , отвечающий за деформацию вертикального распределения температуры. Последующее пространное рассуждение о сложности определения Δ завершается решением положить этот параметр равным нулю. Оппонент считает такое построение текста неоправданной тратой сил для автора и читателей.

3.4. Проведен качественный анализ поведения аномалий температуры в зависимости от скорости ветра, размера ТЦ, его скорости перемещения, характерной стратификации. Однако, предлагаемые на рис.3.9 аппроксимации могут быть использованы только на качественном уровне.

В целом раздел демонстрирует способность автора к анализу сложной системы данных и соотношений между различными их видами.

Результаты опубликованы в статье в Ocean Modelling и хорошо согласуются с результатами других авторов.

Четвёртый раздел «Термическая реакция океана на ТЦ: моделирование» посвящен работе с моделью, разрабатываемой В.Н. Кудрявцевым с соавторами

(59,60 библиографии диссертации). Включившись в работу с этой моделью [90,99], соискатель активно участвовал в ее совершенствовании и апробации на массивах экспериментальных данных.

При обсуждении модели основное внимание обращается на ее компоненты, описывающие эффекты апвеллинга, радиационного затухания инерционных колебаний и напряжения трения ветра. В рамках формального анализа размерностей поток массы и отвечающая ему толщина перемешанного слоя зависят от трех безразмерных аргументов. Сократить число аргументов предлагается с помощью гипотезы о насыщении потока массы как функции скорости трения при сильных ветрах. Предельные случаи зависимости решения исследованы численно (см. Рис.4.2).

В дальнейшем автор отдельно рассматривает эффекты, связанные с собственным движением ТЦ, апвеллингом, создаваемым его бароклиным следом и радиационным трением. Подробное сравнение результатов оценки толщины перемешанного слоя, сделанные по различным моделям (рис.4.8) показало, в целом, хорошее согласие.

В разделе 4.4 предпринимается попытка уточнить оценку эффекта радиационного затухания, связанного с динамикой бароклиных волн, стационарных относительно ТЦ. Таким образом предлагается выйти за рамки оригинальной двумерной модели.

С помощью учета деформации ПС вдоль траектории движения ТЦ предлагается уточнить динамику ПС. При этом предлагаемая модификация модели позволяет существенно улучшить оценку температурных аномалий, связанных с ТЦ, даже при значительных деформациях ПС, когда линеаризованная модель формально неприменима.

В разделе «4.4.6 Ситуационное моделирование термической реакции океана на прохождение ТЦ» представлен обзор особенностей динамики различных ТЦ.

Автору удалось представить разнообразие физических явлений и высказать ряд предположений о направлении дальнейшего совершенствования их

описания. Особое внимание обращено на эффект смещения следа ТЦ вправо от траектории его центра. С непонятной оппоненту осторожностью признается влияние изменений параметра Кориолиса на динамику ТЦ (стр.147, второй абзац: «увеличение размера циклона и параметра Кориолиса ... приводит ...»), т.е. вероятная роль β -эффекта. В работе параметр Кориолиса учитывается локально, определяя интенсивность связанных с ним явлений (инерционных колебаний, апвеллинга). В этом случае смещение следа ТЦ относительно трека требует конкурирующего физического механизма и изменение параметра Кориолиса влияет на характеристики следа лишь количественно. Напротив, β -эффект сам по себе способен обеспечить асимметрию следа ТЦ. Оппонент обращает внимание на работу M. S. Longuet-Higgins (1965), «The response of a stratified ocean to stationary or moving wind-systems», где эффект смещения следа связывается со следом генерируемых волн Россби, возвращаясь таким образом к замечаниям к разделу 1 о корабельных волнах.

Результаты раздела опубликованы в недавней статье в Ocean Modelling и трудах конференции IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.

В разделе имеются неточности, на которые хотелось бы обратить внимание.

4.1. Для оппонента осталось загадкой обозначение «OBS» не расшифрованное ни в подписи к рисунку, ни в тексте.

4.2. Из текста неясно, почему модификация модели представлена как трехмерная, поскольку эффект вертикальных движений описывается параметризацией и не требует обращения к зависимостям от глубины в явном виде.

4.3. Термин «ситуационное моделирование» в названии раздела 4.4.6 представляется неудачным, поскольку ассоциируется с моделированием реальных ситуаций в бизнесе, управлении производственными, социальными процессами и т.п..

В **Заключении** перечислены основные результаты работы в соответствии с поставленными задачами и защищаемыми положениями.

В качестве общего замечания оппонент обращает внимание на многочисленные стилистические огрехи. Так, слово «почти» использовано в тексте 34 раза, в том числе дважды в странном обороте «почти не превышает».

Следует также отметить странное, на взгляд оппонента, оформление иллюстраций. Сразу под рисунком идет его подробное описание, затем отдельно указывается номер рисунка с подписью, в ряде случаев дублирующей этот комментарий. Правильнее было бы собрать все в единую подпись к рисунку дабы облегчить труд читателя.

Несмотря на сделанные выше замечания, оппонент признает высокий научный уровень работы, ее ценность для фундаментальных и прикладных исследований океана. Соискатель обладает необходимыми профессиональными навыками для успешного продолжения работы по тематике диссертационной работы. Сама работа предоставляет для этого солидный задел и уже содержит постановки новых задач совершенствования физических моделей ТЦ.

По теме диссертации опубликовано 12 работ, 4 из которых являются статьями в рецензируемых научных журналах и 8 — тезисами докладов на всероссийских и международных конференциях. Требованиям ВАК при Минобрнауки России удовлетворяют все 4 работы в рецензируемых научных журналах.

Автореферат диссертации в полной мере отражает её содержание и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842.

Диссертация является завершённым научным исследованием, полностью соответствующим требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Пиваев Павел Дмитриевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17. Океанология.

Я, Бадулин Сергей Ильич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук (специальность 25.00.28 – океанология), главный научный сотрудник, руководитель лаборатории нелинейных волновых процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук



Бадулин Сергей Ильич

«22» января 2026 г.

Сведения об организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук
Адрес: 117997, г. Москва, Нахимовский пр., д.36
Телефон/факс: +7 (499) 124-75-65
Адрес электронной почты: badulin.si@ocean.ru

Подпись Бадулина Сергея Ильича заверяю.

Учёный секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, кандидат философских наук



Артемяева Мария Александровна

«22» января 2026 г.