

ОТЗЫВ
официального оппонента, доктора физико-математических наук Троицкой
Юлии Игоревны на диссертационную работу

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

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.6.17. «океанология».

Актуальность темы исследования. Диссертационная работа П.Д.Пиваева посвящена комплексному исследованию реакции океана на воздействие тропических циклонов на основе данных спутникового дистанционного зондирования и использования простых аналитических моделей, описывающих динамику стратифицированного вращающегося океана. Актуальность этой темы не вызывает сомнения. Тропические циклоны (ТЦ) - это самые опасные морские погодные системы, сопровождающиеся экстремально высокими ветровыми нагрузками, катастрофическими ливнями, экстремальным волнением. Они представляют собой один из максимальных рисков для морского судоходства, а также прибрежных поселений и инфраструктуры. ТЦ зарождаются в тропической зоне океанов, однако, ежегодно происходят выходы ТЦ в умеренные широты, сопровождающиеся катастрофическими осадками, вызывающими наводнения. Это явление представляет значительную опасность для Дальневосточных регионов России. Климатические изменения последних десятилетий приводят к смещению треков ТЦ к полюсам, повышая вероятность их выходов в умеренные широты. Все это указывает на необходимость повышения точности и достоверности прогнозов этого грозного явления природы.

Корректное воспроизведение траекторий и интенсивностей ТЦ требует учета обратных связей при взаимодействии атмосферы и океана. Применение численных мезомасштабных объединенных моделей циркуляции атмосферы и океана, учитывающих такое взаимодействие, требует больших вычислительных ресурсов и применимо только в исследовательских целях. С учетом этого разработка простых моделей и параметризаций взаимодействия атмосферы и океана в условиях урагана чрезвычайно важна для решения задач прогноза. Следует отметить, что реакция океана на ТЦ представляет собой совокупность многих физических явлений (перемешивание верхнего слоя океана, генерация ветрового волнения, внутренних волн, инерционных колебаний и т.п.) и определяется целым рядом физических параметров. С учетом этого ее формальная параметризация невозможна, а требуется построение физических моделей многообразия процессов, вызванных в океане интенсивным атмосферным вихрем. Построению таких моделей и их объединению в единый комплекс посвящена настоящая работа. При построении моделей автор опирается на эмпирические данные наблюдений за состоянием океана. При этом преимуществом обладают данные спутниковых дистанционных измерений, которые обеспечивают большой пространственный охват. В диссертации активно используются данные активных и пассивных сенсоров, работающих в СВЧ-диапазоне электромагнитных волн как для получения информации о параметрах океана, так и для верификации моделей.

Автор диссертации предпринял весьма успешную попытку решения актуальной задачи океанологии, связанной с физически обоснованным комплексным описанием снижения температуры поверхности океана, вызванного прохождением ТЦ, которое является одним из основных факторов его эволюции.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и трех приложений.

Во введении отмечается актуальность, приводятся цели и задачи исследования, его объект и предмет, научная новизна полученных результатов, обоснована практическая значимость работы, излагаются методы исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, связь с научными программами, планами, темами и личный вклад соискателя.

Основное содержание диссертации очень хорошо построено методически. В **1-й, 2-й и 3-й главах** диссертации автор строит модели, описывающие реакцию отдельных физических характеристик океана на прохождение ТЦ. **4-я глава** посвящена построению комплексной модели путем синтеза построенных моделей и их верификации.

Первая глава посвящена исследованию реакции уровня океана на прохождение ТЦ. Автор строит модель, в которой представляет возникающие движения в виде суперпозиции бароклинических и баротропной мод инерционно-гравитационных волн стратифицированного океана. Приводится сопоставление предсказаний модели с данными спутниковой альtimетрии, которое показало, что для воспроизведения аномалий уровня моря необходимо рассматривать как минимум две старшие бароклинические моды. Здесь хотелось бы отметить интересный анализ влияния моделей коэффициента сопротивления поверхности океана $CD10$, которые необходимы для вычисления касательного турбулентного напряжения по скорости приводного ветра $U10$. Оказалось, что при использовании известных эмпирических данных о снижении $CD10$ при скорости ветра, превышающей 35-40 м/с, снижают эффект касательных напряжений. Существенно лучше согласуется с данными экспериментов модель, которая не предполагает резкого падения $CD10$ при ураганных ветрах. Это согласуется с последними представлениями о том, что резкое падение зависимости $CD10(U10)$ обусловлено особенностями применения метода профилирования, с помощью которого получены подобные зависимости (см., например, 16. Richter, D. H., C. Wainwright, D. P. Stern, G. H. Bryan, and D.

Chavas, 2021: Potential Low Bias in High-Wind Drag Coefficient Inferred from Dropsonde Data in Hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, 78, 2339–2352, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0390.1>). Полученные автором диссертации результаты косвенно подтверждают эти представления.

Вторая глава посвящена моделированию поверхностных течений, создаваемых ТЦ с учетом бароклинной реакции океана и возмущения поля поверхностных волн, вызванного ТЦ. Строится модель, описывающая проявление ТЦ в доплеровском сигнале спутникового радиолокатора бокового обзора, и ее предсказания сопоставляются с данными радиолокационных измерений со спутников Sentinel-1A и 1B. Модель предполагает, что доплеровский сигнал формируется за счет нескольких факторов: 1) поверхностных течений в виде суммы горизонтальной скорости в бароклиновых возмущениях, инициированных ураганом, и ветровом дрейфе; 2) движения рассеивателей (брегговских волн и баращков обрушающихся волн), а также 3) корреляции волновых вариаций удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) поверхности моря и орбитальных скоростей. Построенная модель доплеровского сигнала является результатом синтеза построенной автором модели течений и моделей волнения и формирования доплеровского сигнала из литературы. Такая синтетическая модель позволяет улучшить оценки доплеровской скорости морской поверхности, находящейся под действием ТЦ.

В третьей главе рассматривается термическая реакция океана на прохождение ТЦ или, иными словами, изменение термической структуры океана под влиянием морского урагана. Такое изменение вызывается двумя процессами: трансформацией поля температуры под влиянием бароклиновых мод внутренних инерционно-гравитационных волн, возбуждаемых ТЦ, и турбулентным перемешиванием. В 3-й главе сделан упор на систематизацию доступных эмпирических данных и новые методы их обработки. Важнейшим проявлением термической реакции океана на прохождение ТЦ является снижение температуры поверхности океана (ТПО), которое представляет

собой важнейший фактор, ограничивающий развитие тропического урагана. С учетом этого корректное воспроизведение температуры поверхности океана под ТЦ имеет большую ценность для решения задач его прогноза. В диссертации рассматриваются оба процесса. Снижение ТПО отчетливо проявляется на спутниковых изображениях, получаемых с помощью радиометров, работающих в различных спектральных диапазонах. С использованием спутниковых измерений аномалий ТПО, вызванных ТЦ, и базы данных измерений буев Argo, интерполированных на регулярную пространственно-временную сетку, сделана оценка толщина верхнего перемешанного слоя (ПС) океана. Автор сформировал базу данных оценок аномалий ТПО для ТЦ с различными характеристиками (скоростью приводного ветра, скоростью перемещения, размерами и т.п.) и различных условий стратификации. На основе сформированной базы данных он получил оценки толщины ПС, а также зависимости аномалий ТПО от характеристик ТЦ и стратификации океана.

Четвертая глава диссертации посвящена построению физической модели термической реакции океана на прохождение ТЦ. Глава начинается с развития теории подобия для толщины верхнего перемешанного слоя океана под действием ТЦ. Определяются основные физические параметры задачи: поток массы в ПС, M , перепад плавучести у основания ПС, Δb , масштаб толщины ПС, h , который определяется как величина размерности длины, составленная из параметров M и Δb . Вводится величина перепада скорости $\Delta u = M/h$ и число Ричардсона, а также получено соотношение между толщиной ПС, числом Ричардсона, потоком массы и эффективной частотой плавучести. Для определения потока массы в ПС предложено уравнение, описывающее баланс эффектов касательного напряжения трения в ТЦ на поверхности воды, который обеспечивает приток количества движения в ПС, и излучения коротких внутренних волн в толщу океана, которое уносит импульс из ПС. Получено автомодельное решение уравнения для M и исследована его зависимость от параметров задачи. Следует отметить

важный вклад автора в решение проблемы описания верхнего ПС, связанный с учетом потерь количества движения за счет излучения коротких внутренних волн. Как оказалось, это позволяет заметно улучшить соответствие модели натурным данным. Также необходимо отметить предложенную автором простую аппроксимацию выражения для потока массы в автомодельных переменных. Наконец, в 4-й главе построена комплексная модель, объединяющая модель бароклиинного отклика на прохождение ТЦ и модель верхнего ПС, которая хорошо предсказывает отрицательную аномалию температуры поверхности океана.

В заключении приводятся основные результаты диссертации.

В приложениях представлены технические детали, касающиеся вывода уравнений, описывающих бароклиинные движения океана и параметров его верхнего ПС.

Научная новизна. Все результаты диссертации, вынесенные на защиту, являются новыми, что обосновывает их научную ценность. Особо следует выделить вывод модели бароклиинной реакции океана на прохождение ТЦ о том, что для воспроизведения аномалии уровня океана необходим учет не менее двух бароклиинных мод внутренних волн. Существенной новизной характеризуется также объяснение особенностей доплеровской скорости поверхности под воздействием ТЦ, измеряемой спутниковыми радиолокаторами с синтезированной апертурой, для которого необходим учет поверхностных течений, как порождаемых касательным напряжением ветра, так и связанных с бароклиинными движениями, а также поверхностных волн. Новизна построенной модели верхнего ПС обусловлена, прежде всего, учетом уноса импульса из ПС короткими внутренними волнами, порождаемыми на нижней границе ПС. Учет этого эффекта позволил добиться хорошего согласия с данными измерений ТПО спутниковыми радиометрами. Безусловно, новой является трёхмерная модель динамической и термической реакции океана, объединяющая модель бароклиинного отклика на прохождение ТЦ и модель верхнего ПС.

Практическая ценность работы. Результаты, полученные в диссертации, могут найти применение при моделировании эволюции ТЦ в рамках мезомасштабных моделей циркуляции атмосферы для задания граничных условий на поверхности океана, отражающих его реакцию на прохождение ТЦ.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации подтверждается согласием ее результатов с объективными натурными данными, полученными инструментами, размещенными на искусственных спутниках Земли. Показателем достоверности и новизны научных результатов работы является их публикация в рецензируемых журналах с высоким рейтингом и представление на конференциях высокого уровня.

Замечания по работе:

1. При построении модели баротропных и бароклинических движений океана было бы уместно обсудить, почему, несмотря на выполнение условия твердой крышки, смещение поверхности имеет место. Для типичных условий желательно привести оценки, показывающие соотношение смещений поверхности и изопикн в толще океана.
2. При обсуждении сил, возбуждающих бароклинические движения, также было бы уместно объяснение причин доминирующей роли касательных напряжений ветра по сравнению с аномалиями давления. Имеется в виду качественное объяснение, подобное следующему. Касательное напряжение ветра действует в горизонтальном направлении и возбуждает горизонтальные движения, а горизонтальная скорость в бароклинических модах имеет максимум на поверхности. Аномалии давления действуют в вертикальном направлении и возбуждают вертикальные движения, а вертикальная скорость на поверхности в бароклинических модах мала.
3. При построении модели волновой составляющей доплеровской скорости используется эмпирическая модуляционная передаточная функция (МПФ), построенная на основе данных измерений в прибрежной зоне

Черного моря при скоростях ветра, не превышающих 15 м/с. Можно ожидать, что в условиях ТЦ эта МПФ должна быть модифицирована. Это обстоятельство было бы необходимо упомянуть в тексте и указать на него в качестве возможного источника ошибок.

4. При расчете аномалии высоты поверхности океана под действием ТЦ в главе 1 показано, что лучшие результаты дает модель коэффициента сопротивления поверхности океана, не убывающая при экстремально высоких скоростях ветра. В то же время, в главе 2 для расчета касательного напряжения трения ветра используется другая модель, в которой коэффициент сопротивления падает при высоких ветрах. Это следовало бы обсудить.
5. По логике изложения параметр h в формуле (4.4) имеет смысл масштаба толщины пикноклина, а не толщины перемешанного слоя. В то же время, в формуле (4.5) h - это толщина ПС. Можно допустить, что используется предположение о пропорциональности этих величин, но это было необходимо обсудить.
6. Есть замечания редакционного характера. Например, величина M в формуле (4.1) – это объемный поток воды. Чтобы получить поток массы, его нужно домножить на плотность воды. Используются жargonные выражения, не везде на рисунках есть обозначения.

Общая оценка работы. Вышеуказанные замечания не снижают общей положительной оценки работы, которую можно охарактеризовать как законченное исследование, выполненное на очень высоком научном уровне. Результаты работы являются новыми и имеют научную и практическую ценность.

Основные результаты диссертации докладывались на научных семинарах и многих международных и всероссийских конференциях.

Результаты диссертации опубликованы в 4 работах в научных изданиях, рекомендованных ВАК и относящихся к высшей категории К1 (согласно списку Рабочей группы ВАК по категорированию научных

изданий от 06.12.2022 № 02–1198). Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертация отвечает всем квалификационным требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», а ее автор **Павел Дмитриевич Пиваев** безусловно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17. Океанология.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук
(специальность 01.04.03 – радиофизика),
старший научный сотрудник,
заведующая отделом нелинейных
геофизических процессов, заведующая
лабораторией нелинейных волновых
процессов в геофизической
гидродинамике Федерального
государственного бюджетного научного
учреждения «Федеральный
исследовательский центр Институт
прикладной физики им. А.В. Гапонова-
Грехова Российской академии наук»

Троицкая Юлия
Игоревна

« 19 » января 2026 г.

Сведения об организации: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Адрес: 603950, г. г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46

Телефон/факс: +7 831 436-64-21

Адрес электронной почты: yuliya@ipfran.ru

Подпись заведующей отделом нелинейных геофизических процессов,
заведующей лабораторией нелинейных волновых процессов в геофизической
гидродинамике ИПФ РАН, доктора физико-математических наук Троицкой
Юлии Игоревны заверяю

Ученый секретарь ИПФ РАН
к.ф.-м.н.



Корюкин Игорь Валерьевич

« 19 » января 2026 г.