

УТВЕРЖДАЮ

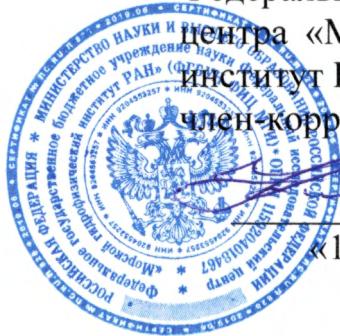
Директор

Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского
центра «Морской гидрофизический
институт РАН»,

член-корреспондент РАН

Коновалов С.К.

«15» октября 2025 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра
«Морской гидрофизический институт РАН»

Диссертация «Реакция океана на прохождение тропических циклонов по данным спутниковых наблюдений и моделирования» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17. Океанология выполнена в лаборатории прикладной физики моря отдела дистанционных методов исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

В период подготовки диссертации соискатель Пиваев Павел Дмитриевич работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Морской гидрофизический институт РАН» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в должности младшего научного сотрудника лаборатории прикладной физики моря отдела дистанционных методов исследований.

В 2021 г. соискатель окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский

государственный гидрометеорологический университет» по специальности «Прикладная гидрометеорология».

Пиваев П.Д. окончил в 2024 г. очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано 15.11.2023 г. Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Федеральным исследовательским центром «Морской гидрофизический институт РАН».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Кудрявцев Владимир Николаевич работает ведущим научным сотрудником лаборатории прикладной физики моря отдела дистанционных методов исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

По результатам рассмотрения диссертации Пиваева П.Д. «Реакция океана на прохождение тропических циклонов по данным спутниковых наблюдений и моделирования» принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы.

Диссертация Пиваева П.Д. посвящена исследованию реакции океана на прохождение тропических циклонов с помощью анализа данных наблюдений и математического моделирования.

Предсказание реакции океана на прохождение тропических циклонов является одной из наиболее актуальных задач современной океанологии. Возникающие под воздействием тропического циклона движения в океане приводят к перераспределению в нём тепла, что главным образом проявляется в виде охлаждения верхнего перемешанного слоя. Данное охлаждение, в свою очередь, оказывает существенное влияние на развитие самого атмосферного возмущения, так что учёт этого механизма имеет

фундаментальное значение для прогнозирования эволюции тропических циклонов.

Существующие модели гидротермодинамики океана, которые можно использовать для прогнозирования и исследования его реакции на тропические циклоны, как правило, либо слишком сложны, так что их применение в исследовательских задачах оказывается затруднительным, либо слишком просты, что делает их применимыми к ограниченному диапазону условий окружающей среды. В этой связи возникает потребность в разработке модели гидротермодинамики океана, основанной на упрощениях, характерных для условий прохождения тропических циклонов, которая проста в использовании и в то же время максимально точно описывает основные физические закономерности данного процесса.

В диссертационной работе выполнено исследование динамической и термической реакции океана на прохождение тропических циклонов на основе модели бароклинной и баротропной реакции океана, а также на основе спутниковых данных о высоте поверхности океана, доплеровской скорости поверхности и температуре поверхности океана, в которых проявляется влияние циклонов.

В работе проведено моделирование аномалий высоты поверхности океана в следах тропических циклонов. Установлен вклад различных мод в смещение поверхности океана, вызванное прохождением тропических циклонов, определён минимальный набор мод и коэффициент сопротивления морской поверхности, которые позволяют воспроизвести данные спутниковых альтиметров. В диссертации выполнено моделирование поверхностных течений для определения их вклада в измерения доплеровской скорости спутниковыми радарами с синтезированной апертурой.

По спутниковым данным о температуре поверхности океана выполнены оценки и сформирована база данных аномалий температуры поверхности океана, вызванных прохождением различных тропических

циклонов, существовавших в Мировом океане с 2010 по 2020 гг. На основе оценок аномалий температуры поверхности океана и данных о фоновых профилях температуры и солёности, измеренных буями Argo, получены оценки толщины перемешанного слоя, создаваемого под влиянием тропических циклонов.

В результате анализа зависимости толщины перемешанного слоя от параметров тропических циклонов и условий стратификации с помощью метода размерностей была экспериментально установлена автомодельность толщины перемешанного слоя по безразмерной скорости движения тропического циклона, безразмерной скорости радиационного трения, связанного с излучением внутренних волн, и по интенсивности апвеллинга. Функциональная зависимость толщины перемешанного слоя от безразмерных параметров, заданная с помощью построенной модели максимального модуля потока массы в перемешанном слое, позволила построить модель толщины этого слоя, пригодную для условий прохождения тропических циклонов.

Настроенная по данным альтиметрии модель бароклинной реакции океана на прохождение тропического циклона была объединена с интегральной моделью перемешанного слоя в трёхмерной модели реакции океана на движущиеся тропические циклоны. На основе базы данных об аномалиях температуры поверхности океана в следах тропических циклонов выполнена настройка трёхмерной модели реакции океана и проведено моделирование с целью подробной интерпретации наблюдаемого термического отклика океана на прохождение четырёх циклонов.

Диссертация Пиваева П.Д. «Реакция океана на прохождение тропических циклонов по данным спутниковых наблюдений и моделирования» по объему выполненных исследований, новизне результатов, научному и практическому значению отвечает требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации.

Выбор тематики диссертационной работы проводился совместно с научным руководителем д. ф.-м. н. В.Н. Кудрявцевым. Соискателем совместно с научным руководителем обоснована актуальность исследования, поставлена цель работы и сформулированы основные задачи для ее достижения. Диссидентом были выбраны тропические циклоны, существовавшие над Мировым океаном с 2010 по 2020 гг., и сформирована база данных их параметров, а также спутниковых измерений температуры поверхности океана и стратификации в океане вдоль траекторий циклонов. Соискателем были разработаны алгоритмы обработки данных, расчёта аномалий температуры поверхности океана, вызванных прохождением тропических циклонов, и выполнены оценки толщины перемешанного слоя в их следах. Соискателем выполнялись все численные эксперименты и расчёты динамической и термической реакции океана на прохождение циклонов. Лично диссидентом выполнялась оценка констант модели толщины перемешанного слоя и обобщённой трёхмерной модели реакции океана и проводилась валидация этих моделей. Анализ полученных результатов и их интерпретация проводились соискателем совместно с научным руководителем.

Степень достоверности результатов проведенных исследований.

В диссертации установлено, что измеряемые спутниковыми альтиметрами аномалии высоты поверхности океана в следах тропических циклонов хорошо воспроизводятся моделью бароклинной и баротропной реакции океана при учете первых двух бароклинических мод и использовании коэффициента сопротивления морской поверхности, имеющего значение между $2,0 \cdot 10^{-3}$ и $2,5 \cdot 10^{-3}$ в диапазоне скоростей ветра от 32 до $90 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Оценки доплеровской скорости морской поверхности, для получения которых выполнялось моделирование бароклинических и дрейфовых течений, создаваемых тропическими циклонами, достаточно хорошо согласуются с

измерениями спутниковых радаров с синтезированной апертурой и превосходят по качеству аналогичные оценки, полученные с помощью статистической модели доплеровской скорости, предложенной Moushe et al. (2012).

Точность воспроизведения измеряемых спутниковыми радиометрами аномалий температуры поверхности океана с помощью построенной в диссертации модели толщины перемешанного слоя по коэффициенту корреляции и индексу рассеяния сопоставима, а по нормированному смещению и стандартному отклонению превосходит качество моделирования аномалий температуры, полученных с помощью моделей и параметризаций, взятых из работ Price (2009), Balaguru et al. (2015), Mei et al. (2013), Liu et al. (2019), Vincent et al. (2012b) и Oey (2023).

Ошибки моделирования интенсивности вызванного циклонами охлаждения поверхности океана с помощью построенной модели толщины перемешанного слоя сопоставимы с ошибками измерения температуры спутниковыми радиометрами в условиях прохождения циклонов. Статистическая значимость оценок экспериментальных зависимостей, а также статистических метрик качества гарантируется большой выборкой рассматриваемых циклонов. Показателем достоверности и новизны научных результатов работы является их публикация в рецензируемых зарубежных и российских журналах и представление на научных конференциях.

Научная новизна результатов проведенных исследований.

1) Впервые установлено, что аномалии высоты поверхности океана в следах тропических циклонов, регистрируемые спутниковыми альтиметрами, описываются моделью бароклинной реакции океана при учете как минимум первых двух бароклинических мод и при задании коэффициента сопротивления морской поверхности в диапазоне от $2,0 \cdot 10^{-3}$ до $2,5 \cdot 10^{-3}$ при скоростях ветра, характерных для тропических циклонов.

2) Впервые получены оценки вклада поверхностных дрейфовых и бароклинических течений в измеряемую спутниковыми радарами с

синтезированной апертурой доплеровскую скорость поверхности океана, согласно которым вклад течений сопоставим с вкладом ветровых волн в окрестности глаза циклона и является определяющим в следе циклона.

3) Впервые получены оценки толщины перемешанного слоя, сформированного под воздействием циклона, рассчитанные по аномалиям температуры поверхности океана, измеряемым спутниковыми радиометрами в следах циклонов, существовавших в Мировом океане с 2010 по 2020 гг., а также экспериментальные количественные оценки зависимости толщины от параметров циклонов, параметра Кориолиса и стратификации океана.

4) Предложена новая модель толщины перемешанного слоя, основанная на концепции устойчивости его нижней границы (в терминах критического числа Ричардсона) и автомодельности дрейфовых течений, учитывающая радиационное трение, связанное с излучением коротких внутренних волн из перемешанного слоя вглубь океана.

5) Детализированы механизмы формирования термической реакции океана с горизонтально-неоднородной стратификацией на прохождение тропических циклонов с изменяющимися во времени параметрами на основе трёхмерной модели динамической и термической реакции океана, объединяющей настроенную модель бароклинного отклика океана и построенную модель толщины перемешанного слоя.

Практическая значимость результатов проведенных исследований.

Настроенная по данным измерений альтиметров модель бароклинной и баротропной реакции океана и модель толщины перемешанного слоя являются основой для создания обобщенной трёхмерной модели динамической и термической реакции океана на прохождение циклонов, которая может послужить эффективным и простым в использовании инструментом для решения различных практических и научных задач, таких как анализ данных наблюдений, оценка влияния тропических циклонов на эволюцию системы океан-атмосфера на глобальных и климатических масштабах. Модель позволяет рассчитать поле аномалии температуры

поверхности океана в области, занятой циклоном, которое может использоваться в модели самого циклона для корректного прогнозирования его интенсивности и траектории движения, что необходимо для своевременного предупреждения опасных природных явлений в прибрежной зоне (большие волны, шквалы, штормовые нагоны), а также обеспечения безопасности судоходства и работ в море.

Ценность научных работ соискателя.

Ценность научных работ соискателя заключается в расширении знаний о процессах, определяющих основные характеристики реакции океана на прохождение тропических циклонов, на основе анализа современных данных дистанционного зондирования, контактных измерений, а также результатов математического моделирования. В рамках модели океана, описывающей его движения в виде суперпозиции нормальных мод, даны новые оценки вклада баротропной и бароклинных мод в создаваемые тропическими циклонами аномалии высоты поверхности океана, которые наблюдаются в измерениях спутниковых альтиметров. В работе впервые получены оценки вклада скоростей поверхностных течений, создаваемых циклонами, в доплеровскую скорость морской поверхности, измеряемую спутниковыми радарами с синтезированной апертурой. Даны новые оценки толщины перемешанного слоя в следах тропических циклонов, а также зависимости этой толщины от параметров циклонов и стратификации океана, полученные по спутниковым данным об аномалиях температуры поверхности. Результаты работы соискателя позволяют построить улучшенную версию трёхмерной модели динамической и термической реакции океана на прохождение тропических циклонов, которая будет полезна при решении широкого спектра исследовательских задач.

Специальность, которой соответствует диссертация.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.6.17. Океанология, отрасль наук – физико-математические науки.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.

По теме диссертации опубликовано в соавторстве 12 научных работ, из них 4 статьи в рецензируемых научных журналах и 8 тезисов докладов на Всероссийских и Международных конференциях.

Требованиям ВАК при Минобрнауки России удовлетворяют 4 работы в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях [1–4]. В их числе 4 работы в рецензируемых научных изданиях, входящих в научометрическую базу Web of Science [1–4] и 4 работы в изданиях, входящая в научометрическую базу SCOPUS [1–4].

Статьи в рецензируемых журналах

1. Field Observations of Breaking of Dominant Surface Waves / **P.D. Pivaev**, V.N. Kudryavtsev, A.E. Korinenko, V.V. Malinovsky // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, No. 16. – P. 3321. – DOI: 10.3390/rs13163321.

2. Tropical cyclone signatures in SAR ocean radial Doppler Velocity / Y.Y. Yurovsky, V.N. Kudryavtsev, M.V. Yurovskaya, **P.D. Pivaev**, S.A. Grodsky // Remote Sensing of Environment. – 2024. – Vol. 311. – P. 114251. – DOI: 10.1016/j.rse.2024.114251.

3. Kudryavtsev V.N. Mixed layer depth parameterization and ocean surface cooling induced by tropical cyclones / V.N. Kudryavtsev, **P.D. Pivaev** // Ocean Modelling. — 2025. — Vol. 195. — P. 102514. — DOI: 10.1016/j.ocemod.2025.102514.

4. **Pivaev P.D.** On Tropical Cyclone Footprints in Sea Surface / P.D. Pivaev, V.N. Kudryavtsev // Physical Oceanography. – 2025. – Vol. 32, No. 3. – P. 408–426.

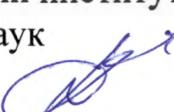
Цитирования материалов и отдельных результатов других авторов в диссертации оформлены соответствующим образом. Результаты диссертационной работы в полной мере опубликованы в рецензируемых

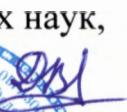
научных изданиях, удовлетворяющих требованиям ВАК Российской Федерации.

Диссертация «Реакция океана на прохождение тропических циклонов по данным спутниковых наблюдений и моделирования» Пиваева Павла Дмитриевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.6.17. Океанология.

Заключение принято на заседании Общеинститутского научного семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Морской гидрофизический институт РАН».

Присутствовало на заседании 24 члена Общеинститутского научного семинара. Результаты голосования: «за» – 24 человека, «против» – 0 человек, «воздержалось» – 0 человек, протокол № 8 от 15 октября 2025 г.

Заместитель председателя
Общеинститутского научного семинара
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федерального исследовательского
центра «Морской гидрофизический институт РАН»,
доктор физико-математических наук  Демышев Сергей Германович

Ученый секретарь
Общеинститутского научного семинара
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Федерального исследовательского
центра «Морской гидрофизический институт РАН»,
кандидат физико-математических наук,
ученый секретарь  Алексеев Дмитрий Владимирович

