

На правах рукописи



Поплавский Евгений Иванович

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ
В МОРСКИХ ШТОРМАХ
С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

1.6.17 – океанология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН).

Научный руководитель: Троицкая Юлия Игоревна, доктор физико-математических наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты: Репина Ирина Анатольевна, доктор физико-математических наук, профессор РАН, ФГБНУ «Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук» (г. Москва)

Лебедев Сергей Анатольевич, доктор физико-математических наук, ФГБНУ «Геофизический центр Российской академии наук» (г. Москва)

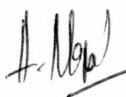
Ведущая организация: ФГБНУ «Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук» (г. Москва)

Защита состоится «7» октября 2024 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.238.03 в ИПФ РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИПФ РАН.

Автореферат разослан «26» августа 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



А. И. Малеханов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Ураганы и циклоны представляют собой чрезвычайно опасные морские погодные системы, которые нередко становятся причиной гибели людей в прибрежных районах, причиняют многомиллионный материальный ущерб и представляют серьезную опасность для коммерческого и пассажирского судоходства [1]. Данные погодные явления наблюдаются преимущественно в тропической области, но в случае внетропического проникновения [2, 3] оказывают значительное влияние и на погоду умеренных и субтропических зон. Подобное проникновение циклонов довольно часто происходит в Японском море вблизи Приморского края и является причиной сильных штормов в этом регионе.

Аномально сильный ветер также наблюдается в Арктике, он возникает за счет вторжений холодных воздушных масс в более низкие широты в области над относительно теплыми морскими поверхностями. Такие условия являются благоприятными для развития полярных ураганов, которые сопровождаются высокими скоростями ветра (до 35–40 м/с). Изменение климата Арктики в 21 веке, обусловившее резкое снижение площади морских льдов, привело к появлению полярных депрессий даже в Восточной Арктике, затрудняя навигацию по Северному морскому пути и освоение арктического шельфа. В связи с этим практическую ценность представляет прогнозирование и мониторинг подобных погодных явлений, например, оценка силы ветра.

Наиболее предпочтительными методами определения характеристик состояния моря для восстановления скорости приводного ветра, волн и течений являются микроволновые методы спутникового дистанционного зондирования. Это связано в первую очередь с тем, что мониторинг морской поверхности можно осуществлять независимо от времени суток, в отличие от оптических методов, а также с тем, что на электромагнитные волны данного диапазона (обычно 1–30 ГГц) не оказывает сильного влияния наличие облачного покрова и осадков, характерных для штормовых условий. Тут стоит отметить ряд ограничений, накладываемых погодными условиями, в зависимости от длины волны зондирующего сигнала. Ледяные облака почти не оказывают влияния на любую длину волны микроволнового диапазона, тогда как водяные облака оказывают существенное влияние только на длины волн менее 2 см. Дождь сильнее ослабляет сигнал, чем облака, но его учет важен только для длин волн менее 4 см. Второй причиной предпочтительности микроволновых методов зондирования является хорошая чувствительность принимаемого сигнала к геометрии поверхности и ее шероховатости, создаваемой ветром и волнами.

Наряду со скоростью приводного ветра, важнейшей динамической характеристикой приводного пограничного слоя атмосферы является касательное

турбулентное напряжение τ или связанная с ним динамическая скорость ветра $u_* = \sqrt{\tau/\rho_a}$. Эти величины характеризуют силовое касательное воздействие ветра на поверхность воды и определяют поток энергии к волнам и их параметры, в частности, среднеквадратичный уклон [4]. Касательное турбулентное напряжение является критически важным параметром, который, например, входит в модели циркуляции атмосферы, используемые при прогнозе ураганов. Для измерения данной величины как раз идеально подходят микроволновые приборы, поскольку касательное турбулентное напряжение главным образом определяет шероховатость морской поверхности, на которой происходит рассеяние электромагнитных волн сантиметрового диапазона [4, 5]. Следствием этого является более сильная корреляция сечения рассеяния морской поверхности с турбулентным напряжением, чем со скоростью ветра, отмеченная рядом авторов [6, 7, 8]. В связи со сложностью измерения турбулентного напряжения в океане, особенно в штормовых условиях, для восстановления данной величины используются эмпирические геофизические модельные функции (ГМФ), связывающие удельную эффективную площадь рассеяния (УЭПР) со скоростью приводного ветра (U_{10}) [9], и балк-формулы, описывающие связь касательного напряжения (динамической скорости) со скоростью ветра и с величиной коэффициента аэродинамического сопротивления поверхности C_D . Зависимость $C_D(U_{10})$ испытывает насыщение при высоких значениях скорости ветра [10], в результате чего данный алгоритм восстановления динамической скорости ветра не применим при скоростях ветра, превышающих 20 м/с. В связи с этим необходимо разработать метод восстановления турбулентного напряжения непосредственно по данным дистанционного зондирования.

Еще одна проблема восстановления турбулентного напряжения при сильных ветрах связана с явлением насыщения рассеянного СВЧ-сигнала на соосной поляризации при скоростях ветра, превышающих 20 м/с [11–13]. Относительно недавно предложен способ решения данной проблемы, который основан на приеме рассеянного СВЧ-сигнала на ортогональной поляризации. Анализ наземных данных о скорости приводного ветра и изображений поверхности воды в СВЧ-диапазоне, полученных спутниковым радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА-изображений), показал, что УЭПР на ортогональной поляризации сохраняет чувствительность к скорости ветра при его высоких скоростях [12–14].

Для построения ГМФ, позволяющих восстанавливать, например, скорость ветра, наряду со спутниковыми данными необходимы и натурные измерения, в качестве которых в открытом океане зачастую выступают данные с буев и со сбрасываемых над ураганами GPS-зондов. GPS-зонды NOAA широко используются для измерения скорости ветра в тропических циклонах на метеорологической высоте 10 м. Главной проблемой при определении приповерх-

ностной скорости ветра в экстремальных штормовых условиях являются большие погрешности измерений вблизи поверхности. В работе [15] был использован один из подходов для оценки таких скоростей ветра в пределах нижнего 150-метрового слоя атмосферы. Суть этого подхода состоит в том, что производится расчет средней скорости ветра в нижнем 150-метровом слое атмосферы, а скорость ветра на высоте 10 м пересчитывается путем умножения полученного усредненного значения на 0,85. В [16] была проведена оценка данного алгоритма (WL150) применительно к ветрам, восстанавливаемым с помощью самолетного радиометра SFMR. Было показано, что усреднение ветра по более тонким слоям, в частности 100 м, 50 м и особенно по 25-метровому слою, имеет меньшие погрешности и больше подходит для извлечения 10-метрового ветра. Таким образом, методы, используемые для определения скорости ветра с помощью GPS-зондов на высоте 10 м, требуют дальнейшего изучения. В настоящей работе будет предложен метод, позволяющий определить параметры атмосферного пограничного слоя, в том числе и приповерхностную скорость ветра, по измерениям в верхней его части, исключая использование алгоритма WL150 или прямые измерения 10-метрового ветра с GPS-зондов, где данные характеризуются большим разбросом и ошибками.

Цели и задачи диссертации

Основной целью настоящей диссертации является разработка и верификация методов восстановления геофизических параметров атмосферного пограничного слоя по данным дистанционного зондирования океана, что подразумевает построение геофизической модельной функции с использованием комплексного подхода, включающего в себя данные активной и пассивной радиолокации, и результаты натурных исследований в широком диапазоне погодных условий, включающем экстремальные.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка метода восстановления параметров приводного атмосферного пограничного слоя по данным наземных измерений.
2. Проверка работоспособности метода восстановления параметров приводного слоя атмосферы на основе сопоставления с результатами расчета атмосферной модели WRF.
3. Разработка метода корректного совмещения данных дистанционного зондирования и наземных измерений.
4. Построение ГМФ для восстановления геофизических параметров приводного атмосферного пограничного слоя по данным дистанционного зондирования на ортогональной поляризации на основе совмещения данных активной и пассивной радиолокации.
5. Верификация предложенной в данной работе ГМФ на основе сопоставления результатов восстановления скорости ветра с ее помощью и резуль-

татов восстановления скорости ветра с помощью других существующих моделей.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы определяется новыми методами исследования и полученными оригинальными результатами. В работе впервые:

1) предложен подход для определения динамической скорости ветра (турбулентного напряжения) и коэффициента аэродинамического сопротивления в урагане по профилям скорости ветра, основанный на использовании обнаруженного свойства автомодельности дефекта скорости ветра в атмосферном пограничном слое;

2) для ураганных условий предложены эмпирические зависимости излучательной способности поверхности океана от динамических параметров приводного атмосферного пограничного слоя, в том числе динамической скорости и аэродинамического сопротивления;

3) получены зависимости эффективного сечения рассеяния поверхности океана на ортогональной поляризации от динамической скорости ветра (турбулентного напряжения) и коэффициента аэродинамического сопротивления, позволяющие восстанавливать их значения по РСА-изображениям в широком диапазоне ветровых условий, включая экстремальные.

Научная и практическая значимость результатов работы

Полученные в работе результаты могут применяться для дистанционного исследования морских погодных явлений, характеризующихся высокими скоростями ветра, где проведение контактных измерений зачастую не представляется возможным. Предложенная в работе геофизическая модельная функция может быть использована для дистанционного восстановления турбулентного напряжения (или связанной с ним динамической скорости), коэффициента аэродинамического сопротивления и скорости приземного ветра в ураганных условиях по радиолокационным спутниковым снимкам, что очень ценно с точки зрения мониторинга и прогнозирования развития тропических циклонов. Представленный в работе метод профилирования, позволяющий восстанавливать динамические параметры приводного атмосферного пограничного слоя в ураганах по данным GPS-зондов, может быть использован для научных исследований этих явлений или построения аналогичных геофизических модельных функций, на основе совмещения с другими инструментами дистанционного зондирования.

Достоверность полученных результатов

Все полученные результаты обладают высокой степенью достоверности и являются обоснованными. Подтверждением этого служит хорошее качественное и количественное совпадение результатов, полученных в данной работе, с результатами аналогичных исследований, а также с результатами численного моделирования. Физическая трактовка полученных результатов, находится в согласии с общепризнанными представлениями. Основные положения диссертации опубликованы в ведущих зарубежных журналах, докладывались на международных и всероссийских конференциях и неоднократно обсуждались на семинарах в ИПФ РАН.

Положения, выносимые на защиту

1. Профиль дефекта скорости ветра в атмосферном пограничном слое интенсивных тропических циклонов (ураганах категорий 4 и 5 по шкале Саффира-Симпсона) является автомоделным. На основе свойства автомоделности параметры приводного атмосферного турбулентного пограничного слоя (динамическая скорость ветра и высота шероховатости) могут быть восстановлены по измерениям в верхней части атмосферного пограничного слоя.

2. Полученная с помощью предложенного метода профилирования зависимость динамической скорости от скорости приводного ветра испытывает насыщение при скоростях ветра, превышающих 32 м/с, а зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления от скорости ветра является немонотонной и состоит из двух участков, растущего и убывающего по степенному закону, с максимальным значением в районе 32 м/с.

3. Применение предложенного метода профилирования и совмещение данных самолетного радиометра и данных падающих GPS-зондов позволяет получить зависимости излучательной способности водной поверхности не только от скорости ветра, а также от динамической скорости ветра и коэффициента аэродинамического сопротивления при условиях морского урагана.

4. Применение предложенного метода профилирования и совмещение данных падающих GPS-зондов или данных самолетного радиометра с измерением радиолокационного сечения рассеяния поверхности океана позволяет получить зависимости УЭПР водной поверхности не только от скорости ветра, а также от динамической скорости ветра и коэффициента аэродинамического сопротивления при условиях морского урагана.

5. Предложенные зависимости позволяют восстанавливать динамическую скорость ветра и коэффициент аэродинамического сопротивления по дистанционным данным, в том числе спутниковым РСА-изображениям на ортогональной поляризации или радиометрическим измерениям поверхности океана в условиях ураганных скоростей ветра.

6. Анализ профилей скорости ветра в урагане по результатам численного моделирования в рамках мезомасштабной модели циркуляции атмосферы с

высоким пространственным разрешением выявил азимутальную изменчивость параметров автотельного профиля дефекта скорости в атмосферном пограничном слое и их зависимость от расстояния до центра урагана.

Апробация результатов работы

Диссертационная работа выполнена в Институте прикладной физики РАН. Результаты диссертации были использованы в ходе исследовательских работ в рамках грантов РФФИ и РФФИ.

Материалы диссертации были представлены:

- на международных конференциях: European Geosciences Union General Assembly 2019, 2020 и 2021 гг., IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2019 и 2021 гг., SPIE Remote Sensing 2021, школа молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосферах» 2022 и 2023 гг.

- на российских конференциях: «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса» 2019, 2020, 2021, 2022 и 2023 гг., VII Всероссийская конференция молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (КИМО-2023), XIX научная школа «Нелинейные волны – 2020», 26-я Нижегородская сессия молодых ученых 2021 г., Научная конференция по радиофизике 2019 г.

- на семинарах ИПФ РАН.

Личный вклад автора

Все приведенные в диссертации результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор диссертации принимал участие в разработке предложенных в данной работе методов восстановления геофизических параметров, поиске и отборе данных дистанционного зондирования и натуральных измерений, а также в обработке этих данных с использованием разработанных автором программных решений: автор написал основную часть программного обеспечения, использованного в работе, в том числе программы для статистической обработки измерений GPS-зондов, программы для обработки данных дистанционного зондирования, полученных методами активной и пассивной радиолокации, и их совмещения с натурными измерениями с GPS-зондов, программы для совмещения РСА-изображений и радиометрических измерений, ряд программ для обработки результатов численного моделирования. Результаты численного моделирования урагана Ирма получены совместно с А. М. Кузнецовой. Постановка задач, обсуждение и интерпретация результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации составляет 108 страниц, включая 37 рисунков. Список литературы содержит 108 наименований, включая работы автора.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются ее цели и задачи, кратко излагается содержание диссертации.

Глава 1 диссертации является обзорной. В ней приведены параметры приводного пограничного слоя атмосферы, описаны дистанционные методы зондирования океана и приведены примеры основных спутниковых радиолокационных приборов, а также инструментов для натуральных измерений в океане. В разделе 1.2 представлено описание наиболее опасных морских погодных систем, для которых характерны экстремальные скорости ветра. В разделе 1.3 приведены параметры приводного атмосферного пограничного слоя, играющие важную роль в прогностических моделях. В частности, касательное турбулентное напряжение определяет параметры ветрового нагона, перемешивание в верхнем слое океана и является движущей силой циркуляции океана. Однако, данную величину в штормовых условиях определяют лишь косвенно, используя ГМФ для восстановления приповерхностной скорости ветра по радиолокационным данным, зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от этой скорости и «балк-формулы». Данный подход имеет ограничения, связанные с большой неопределенностью поведения коэффициента сопротивления при ураганном ветре. В разделе 1.4 приводятся результаты исследований, демонстрирующие насыщение коэффициента сопротивления, а иногда и его последующее уменьшение, при высоких скоростях ветра. Рассмотрены некоторые теоретические модели, объясняющие этот эффект. В разделе 1.5 приведен обзор основных инструментов дистанционного зондирования океана с их преимуществами и недостатками. В разделе 1.6 освещена известная проблема насыщения СВЧ-сигнала на соосной поляризации, которую можно решить использованием микроволнового сигнала на ортогональной поляризации. В разделе 1.7 были представлены примеры инструментов контактных измерений скорости ветра в океане. В заключительном разделе 1.8 рассказано о направлении необходимых исследований.

Глава 2 посвящена разработке метода восстановления параметров приводного слоя атмосферы по данным наземных измерений. В разделе 2.1 описаны недостатки существующих алгоритмов обработки натуральных измерений с GPS-зондов и предложен метод профилирования, основанный на автоматичности дефекта скорости в атмосферном пограничном слое, который позволит их избежать. Также в данном разделе обосновано использование ра-

диометрических измерений, позволяющих существенно увеличить массив данных для коллокации со спутниковыми радиолокационными данными.

В [параграфе 2.2.1](#) приводится статистический анализ данных GPS-зондов для тропических циклонов категорий 4 и 5 и приведены методы их обработки. Необходимо иметь в виду, что автомодельные законы для профилей скорости в атмосферном турбулентном пограничном слое применимы лишь к величинам, осредненным по статистическому ансамблю. В то же время, отдельные профили скорости воздушного потока, измеряемые падающими зондами, являются случайными функциями координаты, которые представляют собой отдельные элементы статистического ансамбля. Кроме того, принимается во внимание, что поле скорости в сформировавшемся урагане близко к радиально-симметричному [17]. В настоящей работе в качестве статистических ансамблей использовались совокупности профилей скорости ветра, измеренных приблизительно в одинаковых условиях, а именно, примерно на одинаковом расстоянии от центра урагана (разброс по расстоянию в каждой группе зондов не превышал 15–20 км) в одни и те же сутки. Также визуально оценивалась схожесть формы профилей скорости ветра внутри каждой из групп, с целью исключения профилей с GPS-зондов, попавших в кардинально другие физические условия, например, в стену глаза урагана. Пример статистического ансамбля изображен на рис. 1 для урагана Matthew 07.10.2016.

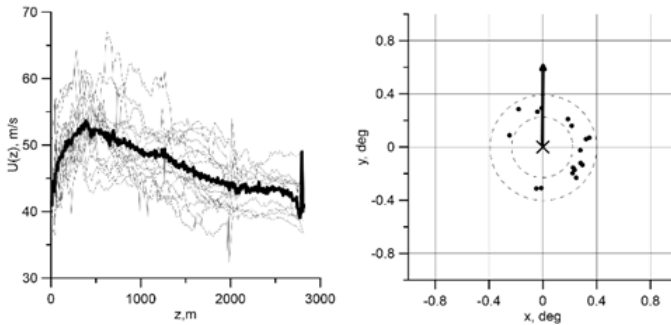


Рис. 1. Левая панель – профили скорости воздушного потока: тонкие кривые – отдельные измеренные профили скорости, толстая кривая – профиль скорости, осредненный по ансамблю. Правая панель – координаты сброса GPS-зондов (кружки) относительно центра урагана (крестик). Стрелка указывает направление движения урагана Matthew 07.10.2016

В [параграфе 2.2.2](#) описан предложенный в данной работе метод профилирования для восстановления динамических параметров приводного атмосферного пограничного слоя, основанный на автомодельности профиля дефекта скорости ветра в атмосферном пограничном слое. Осредненные по сформированным статистическим ансамблям профили скорости ветра с GPS-зондов имеют структуру, сходную со структурой средних профилей скорости

ветра над взволнованной водной поверхностью, наблюдаемых в лабораторных экспериментах по моделированию пограничного слоя в ветро-волновом канале [18], которые являются автомодельными и характеризуются наличием двух участков – логарифмической нижней части профиля и параболической верхней. Основным предположением является то, что осредненные профили, полученные для тропического циклона, описываются аналогичным автомодельным законом. Турбулентный пограничный слой в таком случае можно разделить на две характерные области: слой постоянных потоков импульса, для которого сумма турбулентного и волнового потоков импульса остается постоянной (описывается логарифмической зависимостью), толщиной $\sim 0,3\delta$ (δ – толщина турбулентного пограничного слоя) и «следная» часть, в которой наблюдается максимальная скорость ветра и происходит переход к области невозмущенного течения (описывается параболической зависимостью) [19]. Согласно [19], автомодельный профиль скорости описывается следующим образом:

$$U_{\max} - U(z) = \begin{cases} u_* \left(-\frac{1}{\kappa} \ln(z/\delta) + \gamma \right); & z/\delta < 0.3 \\ \beta u_* (1 - z/\delta)^2; & z/\delta > 0.3 \end{cases} \quad (1)$$

где $\kappa = 0.4$ – постоянная Кармана, γ, β – константы, которые определяются из аппроксимаций.

На рис. 2 показаны все профили скорости в пограничном слое, полученные путем осреднения по ансамблю реализаций профилей скорости, измеренных приблизительно в одинаковых условиях, аналогичных примеру, показанному на рис. 1, которые выражены в физических переменных $U(z)$ и z и в автомодельных переменных $U_{\max} - U(z)/\beta u_*$ и z/δ . Видно, что профили скорости, выраженные в автомодельных переменных (рис. 2, б), группируются около одной кривой.

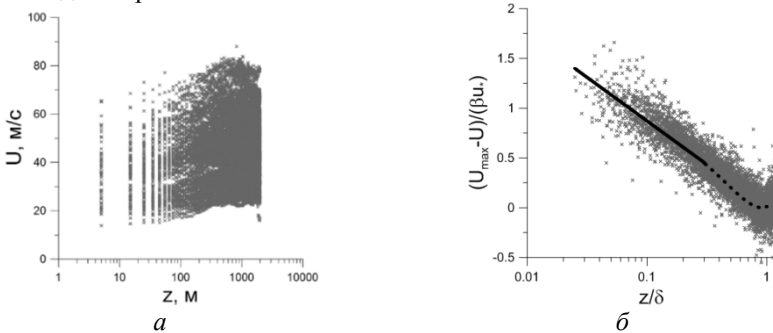


Рис. 2. Осредненные по статистическим ансамблям профили скорости ветра с GPS-зондов в размерных (а) и в автомодельных переменных (б). Сплошная черная кривая соответствует логарифмической аппроксимации, пунктирная – параболической

Входящие в формулу (1) константы, β вычислялись из аппроксимации экспериментальных данных (рис. 2, б). Затем для каждого осредненного по статистическим ансамблям профиля скорости ветра с GPS-зондов с помощью аппроксимации полиномом второй степени их верхней («следной») части и с использованием полученных констант γ и β вычислялись значения динамической скорости ветра u_* , параметра шероховатости z_0 (2), скорости приводного ветра U_{10} (3) и значения коэффициента аэродинамического сопротивления C_D (4).

$$z_0 = \delta \exp(-\kappa U_{\max}/u_* + \gamma\kappa) \quad (2)$$

$$U_{10} = (u_*/\kappa) \ln(H_{10}/z_0) \quad (3)$$

$$C_D = (u_*/U_{10})^2 = \kappa^2 / (\kappa U_{\max}/u_* - \gamma\kappa + \ln(H_{10}/\delta))^2 \quad (4)$$

где $H_{10} = 10$ м.

Преимуществом данного метода является возможность использовать измерения профиля скорости на удалении от водной поверхности (в «следной» части), где имеется существенно большее количество данных, а также исчезает поток импульса от ветра к волнам, который вызывает деформацию профиля скорости ветра. На рис. 3 представлены полученные результаты.

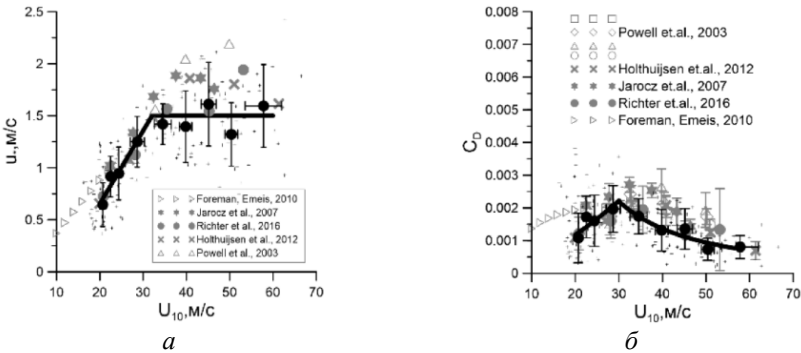


Рис. 3. Зависимости динамической скорости u_* (а) и коэффициента аэродинамического сопротивления поверхности океана C_D (б) от скорости приводного ветра U_{10} . Маленькие черные символы – результаты расчетов по отдельным статистическим ансамблям, составленным из профилей скорости, измеренных приблизительно в одинаковых условиях, большие черные символы – осредненные значения со средним квадратичным отклонением, черные линии – степенные аппроксимации. Серые символы – натурные измерения из [20–24]

Из рис. 3 видно, что при $U_{10} < 30$ м/с величина u_* растет пропорционально U_{10} , при этом коэффициент аэродинамического сопротивления поверхности в этом диапазоне возрастает по степенному закону до максимального значения в районе 30 м/с. Похожее поведение зависимости $C_D(U_{10})$ наблюдалось в работах [21–24]. При $U_{10} > 30$ м/с u_* демонстрирует насыщение и в пределах экспериментальной погрешности ее значение приблизительно равно 1,5 м/с. Соответственно, при $U_{10} > 30$ м/с коэффициент сопротивления убывает пропорционально U_{10}^{-2} .

В настоящем исследовании в качестве радиолокационных данных использовались РСА-изображения, и основным недостатком GPS-зондов в качестве подспутниковых измерений является их малое количество, которое попадает на радиолокационный снимок в результате совмещения. В связи с этим, в качестве альтернативного источника наземных измерений был использован многоканальный микроволновый радиометр (SFMR) [15], установленный на борту исследовательских самолетов NOAA, с которых осуществляется сброс GPS-зондов над ураганами. В параграфе 2.3.1 представлен анализ доступного набора данных SFMR. Далее, в параграфе 2.3.2, произведена их калибровка по восстановленным с данных GPS-зондов динамическим параметрам приводного пограничного слоя атмосферы, т. е. получены эмпирические зависимости излучательной способности поверхности океана от динамической скорости и коэффициента аэродинамического сопротивления (рис. 4).

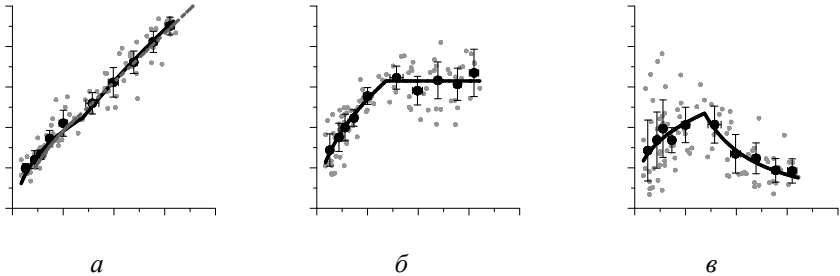


Рис. 4. Сопоставление скорости приводного ветра (а), динамической скорости (б) и коэффициента аэродинамического сопротивления (в), восстановленные по данным падающих GPS-зондов, с излучательной способностью E_w . Серые символы – результаты расчетов по отдельным статистическим ансамблям (их формирование описано в параграфе 2.2.1), черные символы – средние значения, полученные в результате осреднения внутри бинов по E_w , черные линии – предложенные аппроксимации. Пунктирная кривая на (а) – ГМФ из [15]

Видно, что из-за эффекта насыщения, наблюдаемого в пределах доверительных интервалов, предложенный алгоритм справедлив для восстановления динамической скорости только для скоростей ветра, не превышающих 32 м/с (рис. 4, б). Эффект замедления роста динамической скорости (а в некоторых случаях и ее уменьшения) при высоких скоростях ветра наблюдался для результатов ряда исследований [21–24].

В [разделе 2.4](#) приведено обсуждение полученных зависимостей и оценка перспективы их использования для дистанционного измерения динамических параметров атмосферы.

Представленные в [главе 2](#) результаты отражены в публикациях [A1, A3, A6, A11, A12].

В [Главе 3](#) была произведена проверка работоспособности метода восстановления параметров приводного слоя атмосферы по данным GPS-зондов на основе сопоставления с результатами расчета атмосферной модели Weather Research & Forecasting (WRF). В [разделе 3.2](#) проводится анализ подходов к моделированию ураганов в атмосферной модели WRF с применением различных параметризаций. Расчет с рекомендованным авторами модели [25] набором параметризаций для случая урагана Ирма показал слишком сильное отклонение траектории движения тропического циклона в сравнении со спутниковыми снимками. Поэтому был произведен анализ чувствительности модели к применению разных параметризаций и оценка влияния их использования на траекторию урагана, его форму и интенсивность. В качестве лучшего был определен расчет со следующими параметризациями: планетарного пограничного слоя Yonsei University Scheme (YSU), приповерхностного слоя атмосферы Revised MM5 Scheme, микрофизики облачности WRF Single-moment 6-class Scheme, конвекции Kain-Fritsch Scheme, коротковолновой и длинноволновой радиации RRTMG Shortwave and Longwave Radiation Scheme. В [разделе 3.3](#) приведено сравнение результатов расчета с данными GPS-зондов.

Модифицированный метод профилирования, представленный в [параграфе 2.2.2](#), основан на автомодельности профилей скорости ветра в атмосферном пограничном слое урагана, причем предполагается, что эта автомодельность одинаковая для всего урагана. Используя полученные результаты моделирования, в [разделе 3.4](#) было исследовано поведение автомодельных зависимостей профилей скорости ветра в тропическом циклоне. В работе [22] в ураганах выделяется три сектора, основываясь на наблюдении в них разного волнения. Следует предположить, что и вид автомодельных зависимостей в разных частях тропического циклона может отличаться. Используя такое же разбиение урагана по трем секторам, для каждого из них были построены отдельные автомодельные зависимости и сравнены полученные коэффициенты β (или, по сути, наклоны логарифмической части). Разбиение урагана на сектора осуществлялось следующим образом (рис. 5, а): от направления дви-

жения урагана первый сектор лежал в области 20150 градусов, второй – 150–240 градусов, а оставшаяся область была третьим сектором. В результате были получены автомодельные зависимости для каждого сектора тропического циклона, которые имели следующие значения для коэффициента β : 10.09 ± 0.225 (1 сектор), 9.80 ± 0.35 (2 сектор), 12.89 ± 0.46 (3 сектор) (рис. 5, б, в, г). Как видно из данных значений, выделяется коэффициент β для 3 сектора, тогда как коэффициенты для 1-го и 2-го секторов примерно одинаковы в пределах доверительных интервалов.

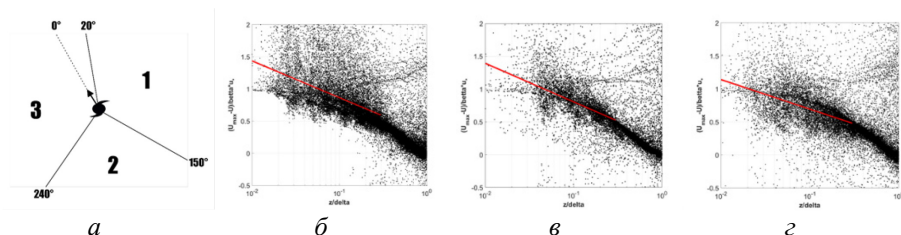


Рис. 5. Секторальное разбиение урагана в соответствии с [20], стрелкой указано направление движения урагана (а). Автомодельные профили скорости ветра для 1-го сектора (б), для 2-го (в), для 3-го (г). Линия – логарифмическая аппроксимация нижней части граничного слоя (до $0.3z/\delta$)

Для исследования поведения этих секторальных автомодельных зависимостей от расстояния было произведено разбиение данных в каждом секторе на бина шириной по 10 км по расстоянию от центра урагана, начиная с 40 км, где начинается стена глаза урагана с высокими скоростями ветра, и по данным каждого бина были построены автомодельные зависимости. На рис. 6 продемонстрированы полученные результаты, а именно зависимости коэффициента β от расстояния до центра тропического циклона для каждого сектора.

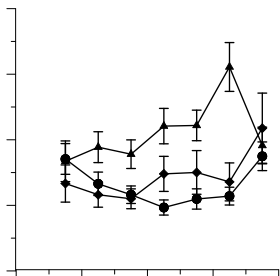


Рис. 6. Зависимость коэффициента β от расстояния до центра урагана для трех его секторов. Круглые точки – 1-й сектор, ромбы – 2-й, треугольники – 3-й

Как видно из графиков, автомодельные зависимости несколько отличаются между собой не только в зависимости от выбора сектора урагана, но и от расстояния до его центра. Следует отметить, что в работе [22] были рассмотрены зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от скорости ветра для данных секторов и зависимость для переднего левого сектора (в нашем случае обозначен под номером 3) также заметно выделялась на фоне остальных, что было связано с разным волнением в данных секторах. В предыдущих главах настоящей работы коэффициенты β и γ были получены на основе автомодельной зависимости, построенной на всем доступном наборе данных с GPS-зондов без разделения на сектора. Произведенная оценка коэффициентов β свидетельствует о том, что автомодельные законы несколько различаются в зависимости от сектора урагана на определенных расстояниях до его центра, и этот факт было бы полезно учитывать в будущем при восстановлении геофизических параметров, если для этого имеется достаточное количество экспериментальных данных. На данный момент одних только измерений с GPS-зондов, используемых в данной работе, недостаточно для построения автомодельных зависимостей не только отдельно для каждого сектора, но и с разграничением по расстоянию от центра урагана.

В разделе 3.5 приводятся выводы к третьей главе.

Представленные в главе 3 результаты отражены в публикациях [A2, A9].

Глава 4 посвящена разработке геофизической модельной функции, позволяющей по спутниковым PCA-изображениям на ортогональной поляризации восстанавливать динамическую скорость, коэффициент аэродинамического сопротивления и скорость ветра для широкого диапазона условий, включая экстремальные. В разделе 4.1 приведен обзор существующих ГМФ для восстановления скорости ветра и отражена необходимость разработки ГМФ для восстановления касательного турбулентного напряжения непосредственно по данным дистанционного зондирования без использования «балк-формул».

В разделе 4.2 был обоснован выбор спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B в качестве источников PCA-изображений на ортогональной поляризации и режима работы Interferometric Wide swath (IW) радиолокатора C-SAR (на частоте 5,405 ГГц), базирующегося на этих спутниках. Описаны отбор и обработка радиолокационных снимков, содержащих области высоких скоростей ветра в тропических циклонах.

В разделе 4.3 представлены методы совмещения спутниковых PCA-изображений и наземных измерений с GPS-зондов и с самолетного радиометра (SFMR), основанные на предположении о квазистационарности урагана во время натуральных измерений. Для проверки этого предположения и корректного совмещения данных для каждого ТЦ были проанализированы их динамические характеристики (максимальная скорость ветра и минимальное давление на уровне моря (MWS, MSLP)). В параграфе 4.3.1 представлен метод со-

вмещения отобранных РСА-изображений и данных измерений с GPS-зондов. Полученные зависимости УЭПР от приповерхностной скорости ветра U_{10} и динамической скорости u_* согласуются с зависимостями из работы [26] и продолжают их в область более высоких скоростей ветра. Основным недостатком GPS-зондов в качестве подспутниковых измерений является их малое количество, которое попадает на радиолокационный снимок в результате совмещения. В [параграфе 4.3.2](#) описан метод совмещения РСА-изображений и измерений SFMR, для которых в [параграфе 2.3.2](#) были получены эмпирические зависимости излучательной способности от u_* и C_D . В результате такого совмещения удастся получить значительно больший массив данных. В процессе получения изображения в выбранном режиме работы (IW) сканирующий луч зондирующего устройства сначала собирает информацию по трем отдельным полосам (так называемым субполосам, см. рис. 7, а), при этом создается три отдельных изображения, которые впоследствии сшиваются в одно, являющееся конечным продуктом. Диапазон углов падения составляет 30.85° – 45.57° . Пример РСА-изображения со спутника Sentinel-1A для одного из выбранных ураганов с наложенным на него треком урагана и треком самолета, на борту которого размещался радиометр, приведен на рис. 7, а. Также на рис. 7, б, в представлено распределение максимальной скорости ветра (MWS) вдоль траектории урагана и географическое расположение РСА-изображений.

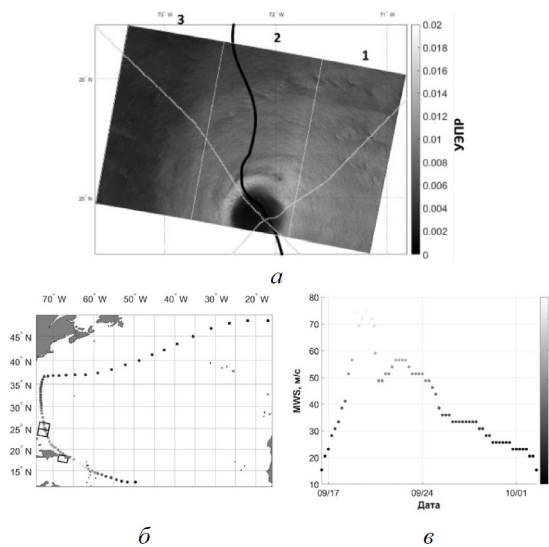


Рис. 7. Иллюстрация набора данных для урагана Мария: а – РСА-изображение (23.09.2017) в режиме работы IW на VH поляризации, серая кривая – траектория движения самолета с SFMR, черная кривая – траектория урагана, серыми перпендикулярными снимку линиями и цифрами отмечены различные субполосы; б – трек урагана с максимальной скоростью ветра, обозначенной цветом, и контуры отобранных для совмещения РСА-изображений; в – зависимость максимальной скорости ветра урагана Мария от времени

В разделе 4.4 с помощью кусочно-заданной степенной аппроксимации были получены эмпирические зависимости УЭПР от скорости ветра (Рис. 8, *а*) и динамической скорости (рис. 8, *б*) для трех диапазонов углов падения (отдельно для каждой субполосы снимков). Зависимость УЭПР от коэффициента аэродинамического сопротивления (рис. 8, *в*) была получена одна для всего диапазона углов (всех субполос). Это связано с тем, что зависимость $C_D(E_w)$ (рис. 4, *в*) немонотонна и имеет два разных участка (растущий и спадающий), которые рассматривались отдельно, в отличие от зависимостей для U_{10} и u_* (область, где динамическая скорость константа, не использовалась при построении ГМФ). В случае рассмотрения доступного набора данных по каждой субполосе на участок зависимости для коэффициента сопротивления в области высоких скоростей ветра приходится слишком мало точек, чтобы построить там степенную аппроксимацию, тогда как при использовании всего массива это сделать уже возможно.

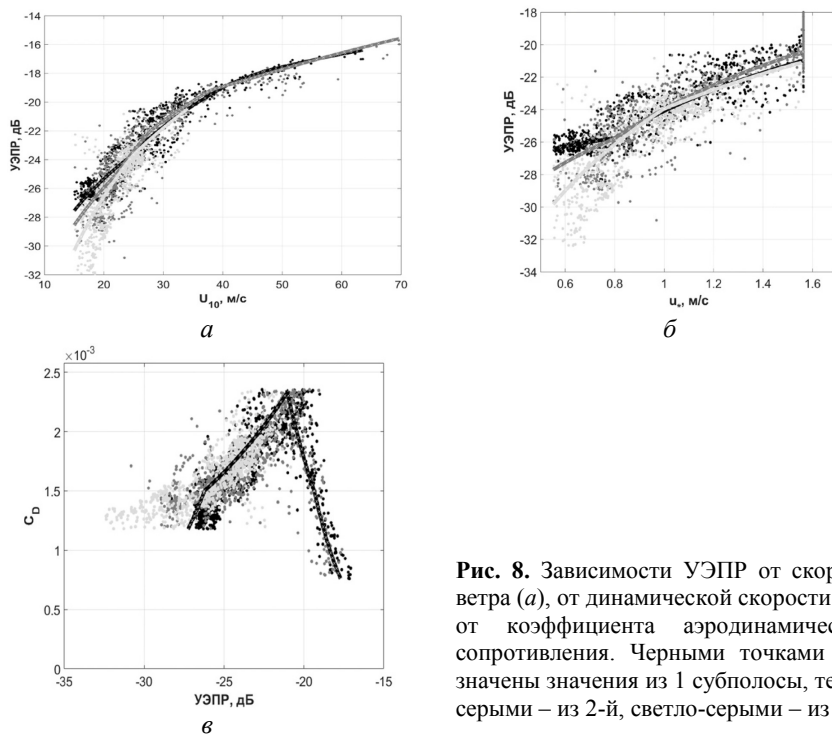


Рис. 8. Зависимости УЭПР от скорости ветра (*а*), от динамической скорости (*б*) и от коэффициента аэродинамического сопротивления. Черными точками обозначены значения из 1 субполосы, темно-серыми – из 2-й, светло-серыми – из 3-й

Данную ГМФ для удобства при сравнении с другими моделями далее будем называть MADP-S1 (модель для восстановления динамических парамет-

ров атмосферного пограничного слоя, англ. the model for the retrieval of atmospheric boundary layer dynamic parameters) [27]. На рис. 9 представлено сравнение зависимости УЭПР от U_{10} с известными аналогичными ГМФ для восстановления скорости ветра (модели MS1A, S1IW.NR, H14E, H14S и S-C2PO). Видно, что ГМФ MADP-S1 согласуется с H14E и MS1A.

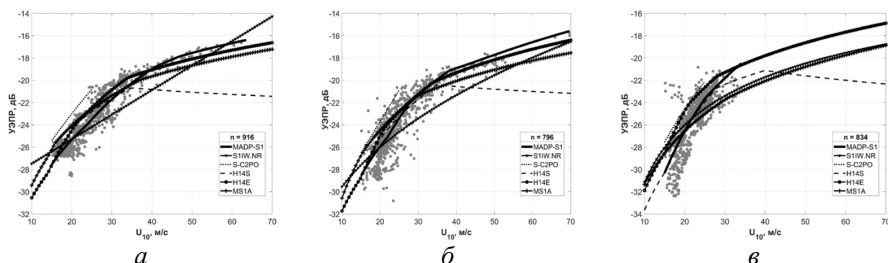


Рис. 9. Зависимости УЭПР от скорости ветра для субслоя 1 (*a*); субслоя 2 (*б*); субслоя 3 (*в*). Черная сплошная линия соответствует MADP-S1, остальные кривые иллюстрируют следующие ГМФ: S1IW.NR (линия с треугольниками), MS1A (крестики), H14E (кружки), H14S (пунктирная линия), S-C2PO (пунктирная линия), n соответствует количеству точек данных, используемых для построения предлагаемой в данной работе ГМФ MADP-S1

Также в этом разделе была проведена верификация предложенной в данной работе ГМФ на основе сопоставления результатов восстановления скорости ветра с ее помощью и результатов восстановления скорости ветра с помощью других существующих моделей на независимом наборе данных.

В качестве примера, с помощью ГМФ MADP-S1 были получены поля скорости ветра, динамической скорости и коэффициента аэродинамического сопротивления по РСА-изображению урагана Мария 23 сентября 2017 года (рис. 10). Для стены глаза тропического циклона наблюдалось резкое увеличение скорости ветра и уменьшение коэффициента сопротивления. Следует отметить, что, поскольку для построения ГМФ параметры u_* , C_D и U_{10} восстанавливались через коэффициент излучения, то некоторые особенности предлагаемых радиометрических эмпирических зависимостей находят отражение в результатах расчетов в рамках сконструированной ГМФ (например, такие, как снижение коэффициента аэродинамического сопротивления в области высоких скоростей ветра).

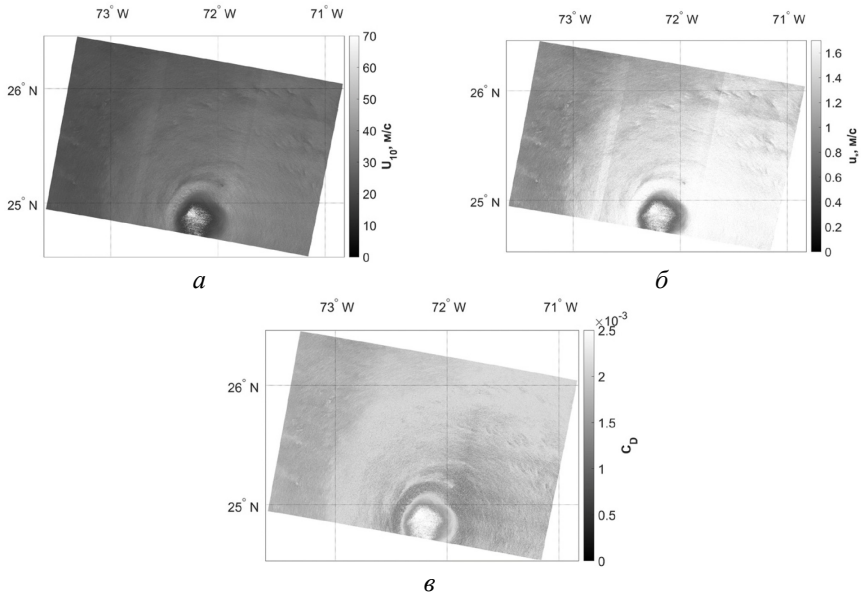


Рис. 10. Иллюстрация распределений U_{10} (а), u_* (б) и C_D (в), полученных по РСА-изображению урагана Мария 23 сентября 2017 года со спутника Sentinel-1A

Преимущество предложенной ГМФ заключается в том, что она позволяет восстанавливать динамическую скорость ветра (или турбулентное напряжение) непосредственно из радиолокационных данных без использования «балк-формул». В то же время, недостатками сконструированной ГМФ являются низкий верхний предел для восстановления скорости ветра U_{10} в третьей субполосе снимка, а также отсутствие угловой зависимости для восстановления C_D . Эти недостатки могут быть устранены в будущем за счет расширения массива данных.

Представленные в **главе 4** результаты отражены в публикациях [A1, A10, A13].

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предложен метод восстановления динамической скорости ветра и коэффициента аэродинамического сопротивления в урагане, основанный на использовании свойства автомодельности профиля дефекта скорости ветра в атмосферном пограничном слое. При этом параметры приводного атмосферного турбулентного пограничного слоя (динамическая скорость ветра и высота шероховатости) восстанавливаются по измерениям в верхней части атмосферного пограничного слоя. На основании предложенного метода показано, что имеет место насыщение динамической скорости при высоких скоростях ветра и немонотонная зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления от скорости ветра.

2. С использованием предложенного метода профилирования на основе совмещения данных самолетного микроволнового радиометра со ступенчатым изменением частоты и данных падающих GPS-зондов при условиях морского урагана получены зависимости излучательной способности водной поверхности не только от скорости ветра, а также от динамической скорости ветра и коэффициента аэродинамического сопротивления.

3. На основе сопоставления данных самолетного радиометра и радиолокационных спутниковых данных получена зависимость, позволяющая восстанавливать распределение динамической скорости и коэффициента аэродинамического сопротивления по спутниковым РСА-изображениям на ортогональной поляризации в широком диапазоне ветровых условий, включая экстремальные.

4. На основе анализа профилей скорости ветра в урагане по результатам численного моделирования в рамках мезомасштабной модели циркуляции атмосферы с высоким пространственным разрешением было показано, что параметры автомодельного профиля дефекта скорости в атмосферном пограничном слое зависят от сектора урагана и от расстояния до его центра.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Needham Hal F., Barry D. Keim, David Sathiaraj.* A review of tropical cyclone-generated storm surges: Global data sources, observations, and impacts // *Reviews of Geophysics.* 2015. V. 53, № 2. P. 545–591.

2. *Harr Patrick A., Russell L. Elsberry* Extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific. Part I: Evolution of structural characteristics during the transition process // *Monthly Weather Review.* 2000. V. 128, № 8. P. 2613–2633.

3. *Harr Patrick A., Russell L. Elsberry, Timothy F. Hogan* Extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific. Part II: The impact of midlatitude circulation characteristics // *Monthly weather review.* 2000. V. 128, № 8. P. 2634–2653.

4. *Plant William J.* A Relationship between Wind Stress and Wave Slope // *Journal of Geophysical Research-Oceans*. 1982. V. 87, № C3. P. 1961–67.
5. *Liu W. T.* Progress in Scatterometer Application. // *Journal of Oceanography*. 2002. V. 58, № 1. P. 121–36.
6. *Jones W. L., Schroeder L. C.* Radar Backscatter from the Ocean: Dependence on Surface Friction Velocity // *Boundary-Layer Meteorology*. 1978. V. 13, № 1–4. P. 133–149.
7. *Weissman D. E., Davidson K. L., Brown R. A., Friehe C. A., Li F.* The relationship between the microwave radar cross section and both wind speed and stress: model function studies using frontal air-sea interaction experiment Data // *J. Geophysical Research*. 1994. V. 99. P. 10087–10108.
8. *Colton M.C.* Tower-based measurements of normalized radar cross-section from lake-Ontario – evidence of wind stress dependence // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100, № C5. P. 8791–8813.
9. *Hersbach H., Stoffelen A., de Haan S.* An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5 // *J. Geophysical Research*. 2007. V. 112, Art. No. C03006.
10. *Donelan M. A., Haus B. K., Reul N., Plant W. J., Stiassnie M., Graber H. C., Brown O. B., Saltzman E. S.* On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds // *Geophysical Research Letters*. 2004. V. 31, Art. No. L18306.
11. *Donnelly W. J., Carswell J. R., McIntosh R. E., Chang P. S., Wilkerson J., Marks F., Black P. G.* Revised Ocean Backscatter Models at C and Ku Band under High-Wind Conditions // *J. Geophysical Research*. 1999. V. 104(C5). P. 11485–11497.
12. *Vachon P. W., Wolfe J.* C-band cross-polarization wind speed retrieval // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2011. V. 8, № 3. P. 456–459.
13. *Zhang B., Perrie W.* Cross-polarized synthetic aperture radar: A new potential measurement technique for hurricanes // *Bull. American Meteorological Society*. 2012. V. 93, № 4. P. 531–541.
14. *van Zadelhoff G.-J., Stoffelen A., Vachon P. W., Wolfe J., Horstmann J., Rivas M. B.* Scatterometer Hurricane Wind Speed Retrievals Using Cross Polarization // *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*. 2013. V. 7, № 2. P. 7945–7984.
15. *Uhlhorn E. W., Black P. G., Franklin J. L., Goodberlet M., Carswell J., Goldstein A. S.* 2007. Hurricane surface wind measurements from an operational Stepped Frequency Microwave Radiometer // *Monthly Weather Review*. 2007. V. 135. P. 3070–3085.
16. *Polverari F., Sapp J. W., Portabella M., Stoffelen A., Jelenak Z., Chang P.S.* On dropsonde surface-adjusted winds and their use for the stepped frequency microwave radiometer wind speed calibration // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2022. V. 60. P. 1–8.

17. Emanuel K. A. An Air-Sea Interaction Theory for Tropical Cyclones. Part I: Steady-State Maintenance // J. Atmospheric Sciences. 1986. V. 43. P. 585–604.
18. Kandaurov A. A., Troitskaya Y. I., Sergeev D. A., Vdovin M. I., Baidakov G. A. Average velocity field in the air flow over the water surface in laboratory study of the hurricane conditions // Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2014. V. 50. P. 399–410.
19. Hintze J. O. Turbulence: An Introduction to Its Mechanism and Theory // McGraw-Hill: New York, NY, USA. 1959. P. 586.
20. Foreman R. J., Emeis S. Revisiting the Definition of the Drag Coefficient in the Marine Atmospheric Boundary Layer // J. Phys. Oceanogr. 2010. V. 40. P. 2325–2332.
21. Powell M. D., Vickery P. J., Reinhold T. A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones // Nature. 2003. V. 422. P. 279–283.
22. Holthuijsen L. H., Powell M. D., Pietrzak, J. D. Wind and waves in extreme hurricanes // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, № C09003.
23. Jarosz E., Mitchell D. A., Wang D. W., Teague W. J. Bottom-Up Determination of Air-Sea Momentum Exchange Under a Major Tropical Cyclone // Science. 2007. V. 315. P. 1707–1709.
24. Richter D. H., Bohac R., Stern D. P. An assessment of the flux profile method for determining air–sea momentum and enthalpy fluxes from dropsonde data in tropical cyclones // J. Atmos. Sci. 2016. V. 73. P. 2665–2682.
25. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Duda M. G., Huang X-Y, Wang W., Powers J. G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3 // NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR. 2008. P. 113.
26. Hwang P. A., Stoffelen A., van Zadelhoff G.-J., Perrie W., Zhang B., Li H., Shen H. Crosspolarization geophysical model function for C-band radar backscattering from the ocean surface and wind speed retrieval // J. Geophys. Res. Ocean. 2015. V. 120. P. 893–909.
27. Ermakova O., Rusakov N., Poplavsky E., Sergeev D., Troitskaya Y. Friction Velocity and Aerodynamic Drag Coefficient Retrieval from Sentinel-1 IW Cross-Polarization C-SAR Images under Hurricane Conditions // Remote Sens. 2023. V. 15. P. 1985.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. *Ermakova O., Rusakov N., Poplavsky E., Sergeev D., Troitskaya Y.* Friction Velocity and Aerodynamic Drag Coefficient Retrieval from Sentinel-1 IW Cross-Polarization C-SAR Images under Hurricane Conditions // *Remote Sens.* 2023. V. 15. P. 1985.

A2. *Poplavsky E., Kuznetsova A., Troitskaya Y.* Wind Speed Analysis Method within WRF-ARW Tropical Cyclone Modeling // *J. Mar. Sci. Eng.* 2023. V. 11. P. 1239.

A3. *Poplavsky E., Rusakov N., Ermakova O., Sergeev D., Troitskaya Y.* Towards an Algorithm for Retrieval of the Parameters of the Marine Atmospheric Boundary Layer at High Wind Speeds Using Collocated Aircraft and Satellite Remote Sensing // *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. V. 10. P. 1136.

A4. *Ermakova O. S., Sergeev D. A., Rusakov N. S., Poplavsky E. I., Balandina G. N., Troitskaya Y. I.* Toward the GMF for Wind Speed and Surface Stress Retrieval in Hurricanes Based on the Collocated GPS-Dropsonde and Remote Sensing Data // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* 2020. V. 13. P. 4803–4808.

A5. *Troitskaya Yu., Abramov V., Baidakov G., Ermakova O., Zuikova E., Sergeev D., Ermoshkin A., Kazakov V., Kandaurov A., Rusakov N., Poplavsky E., Vdovin M.* Cross-Polarization GMF For High Wind Speed and Surface Stress Retrieval // *Journal of Geophysical Research: Oceans.* 2018. V. 123, № 8. P. 5842–5855.

A6. *Poplavsky E., Rusakov N., Troitskaya Yu.* On retrieval of the atmospheric boundary layer dynamic parameters based on collocated measurements of the SFMR and NOAA GPS dropwindsondes in hurricane // *IGARSS 2021 – 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.* 2021. P. 73117314.

A7. *Troitskaya Yu., Ermakova O., Rusakov N., Poplavsky E., Sergeev D., Balandina G.* Towards the GMF for wind speed and surface stress retrieval in hurricanes based on the collocated dropsonde data and cross-polarization SAR images // *IGARSS 2019 – 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.* 2019. P. 4693–4696.

A8. *Ermakova O. S., Rusakov N. S., Poplavsky E. I., Sergeev D. A., Balandina G. N., Troitskaya Yu. I.* Wind stress retrieval in tropical cyclones from collocated GPS-dropsonde data and cross-polarization Sentinel-1 IW mode // *Proc. SPIE 11857, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions.* 2021.

A9. *Poplavsky E. I., Kuznetsova A. M., Troitskaya Y. I.* Analysis of Wind Speed Profiles in Hurricane Irma. // *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes – 2022. PMMEEP 2022. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences.* Springer, Cham. 2023.

A10. *Ермакова О. С., Русаков Н. С., Поплавский Е. И., Сергеев Д. А., Троицкая Ю. И.* О восстановлении скорости ветра и скорости трения ветра на

основе данных Sentinel-1 и SFMR в условиях тропических циклонов // «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2022. Т. 19, № 6. С. 175–185.

A11. Поплавский Е. И., Русаков Н. С., Ермакова О. С., Баландина Г. Н., Сергеев Д. А., Троицкая Ю. И. О восстановлении динамических параметров пограничного слоя атмосферы на основе измерений радиометра SFMR и GPS-зондов NOAA в ураганных условиях // «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2021. Т. 18, № 2. С. 205–215.

A12. Ермакова О. С., Сергеев Д. А., Русаков Н. С., Поплавский Е. И., Баландина Г. Н., Троицкая Ю. И. Восстановление параметров приводного пограничного слоя в тропическом циклоне по данным падающих GPS-зондов // «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2019. Т. 16, № 5. С. 301–309.

A13. Ермакова О. С., Сергеев Д. А., Русаков Н. С., Поплавский Е. И., Баландина Г. Н., Троицкая Ю. И. Восстановление параметров приводного пограничного слоя в тропическом циклоне на основе совмещения данных падающих GPS-зондов и спутниковых радиолокационных изображений // «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 2019. Т. 16, № 6. С. 51–59.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1. Применение данных дистанционного зондирования для мониторинга погодных условий в океане

- 1.1. Введение
- 1.2. Опасные морские погодные явления
- 1.3. Описание параметров приводного пограничного слоя атмосферы
- 1.4. Поведение коэффициента аэродинамического сопротивления при высоких скоростях ветра
- 1.5. Обзор дистанционных методов зондирования океана
- 1.6. Насыщение рассеянного СВЧ-сигнала на соосной поляризации при высоких скоростях ветра
- 1.7. Обзор контактных методов измерений в океане
 - 1.7.1. Метеорологические буи
 - 1.7.2. GPS-зонды
- 1.8. Заключение

Глава 2. Разработка методики восстановления параметров приводного слоя атмосферы по данным наземных измерений

- 2.1. Введение
- 2.2. Методика восстановления параметров приводного слоя атмосферы по данным падающих GPS-зондов NOAA
 - 2.2.1. Статистический анализ данных
 - 2.2.2. Восстановление динамических параметров приводного атмосферного пограничного слоя в ураганах по данным GPS-зондов
- 2.3. Получение эмпирических зависимостей излучательной способности поверхности воды по данным SFMR от динамической скорости ветра и коэффициента аэродинамического сопротивления
 - 2.3.1. Анализ радиометрических данных прибора SFMR, полученных в ураганах
 - 2.3.2. Сопоставление динамических параметров приводного пограничного слоя атмосферы при урагане со значениями излучательной способности морской поверхности по данным радиометра SFMR
- 2.4. Заключение

Глава 3. Проверка работоспособности методики восстановления параметров приводного слоя атмосферы по данным падающих GPS-зондов на основе сопоставления с результатами расчета по модели WRF

- 3.1. Введение
- 3.2. Моделирование урагана Ирма в рамках атмосферной модели WRF
- 3.3. Сопоставление результатов расчета с данными GPS-зондов
- 3.4. Анализ автомодельности дефекта профиля скорости ветра по результатам моделирования
- 3.5. Заключение

Глава 4. Метод восстановления параметров атмосферного пограничного слоя на основе совмещения данных Sentinel-1 и наземных измерений в условиях тропических циклонов

- 4.1. Введение
- 4.2. Анализ данных дистанционного зондирования со спутника Sentinel-1
- 4.3. Совмещение спутниковых PCA-изображений и наземных данных
 - 4.3.1. Совмещение PCA-изображений со спутника Sentinel-1 и наземных данных GPS-зондов
 - 4.3.2. Совмещение PCA-изображений со спутника Sentinel-1 и данных SFMR
- 4.4. Восстановление параметров атмосферного пограничного слоя при ураганных ветрах по PCA-изображениям со спутника Sentinel-1
 - 4.4.1. Восстановление приповерхностной скорости ветра
 - 4.4.2. Восстановление динамической скорости
 - 4.4.3. Восстановление коэффициента аэродинамического сопротивления
- 4.5. Заключение

Заключение

ПОПЛАВСКИЙ Евгений Иванович

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ
В МОРСКИХ ШТОРМАХ
С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Автореферат

Подписано к печати 24.06.2024 г.
Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 100 экз. Заказ № 32(2024).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46