

*На правах рукописи*



Сазонов Дмитрий Сергеевич

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАДИОТЕПЛОВОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ ВЗВОЛНОВАННОЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ: АНАЛИЗ  
СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ И НАДВОДНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Москва-2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки  
Институте космических исследований Российской академии наук

**Научный руководитель:** **Шарков Евгений Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор.

**Официальные оппоненты:** **Репина Ирина Анатольевна**, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией взаимодействия атмосферы и океана Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук.

**Смирнов Михаил Тимофеевич**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник лаборатории инструментальных и информационных методов исследования окружающей среды средствами дистанционного зондирования Фрязинского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Защита диссертации состоится «28» сентября 2018 г., в 10-00, на заседании диссертационного совета Д002.231.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте: <http://cplire.ru/rus/dissertations/Sazonov/index.html>

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физ-мат. наук



Копылов Юрий  
Леонидович

## Общая характеристика работы

В середине XX века, благодаря технологическому развитию, дистанционное наблюдение Земли стало отдельным направлением научных исследований. Пройдя длинный путь развития от фотографических систем до мультиспектральных сканеров и зондировщиков дистанционное зондирование Земли стало одним из эффективных инструментов наблюдения и изучения нашей планеты. Одним из неоспоримых преимуществ дистанционного зондирования по сравнению с традиционными средствами является сама суть данного метода – изучение объекта на расстоянии, что позволяет заглянуть в самые труднодоступные уголки нашей планеты, такие как северный и южный полюс, пустыни, труднопроходимые джунгли и огромные океаны.

За последние годы было запущено большое количество искусственных спутников Земли с разнообразным оборудованием дистанционного зондирования. Эффективность использования получаемых с помощью них данных непрерывно растет в области мониторинга состояния поверхности нашей планеты и в исследованиях процессов ее взаимодействия с атмосферой. Набор задач, связанный с применением данных дистанционного зондирования невообразимо широк, начиная с актуальных приложений практического характера (краткосрочное и долгосрочное прогнозирование погоды, предупреждение стихийных бедствий и многих других), и заканчивая фундаментальными исследованиями например, процессов изменения климата.

Для глобального и регионального исследования и мониторинга системы океан-атмосфера хорошо зарекомендовала себя микроволновая радиометрия. Данное направление является одним из инструментов дистанционного зондирования Земли. Радиометрические приемники измеряют собственное радиотепловое излучение физических объектов в диапазоне дециметровых, сантиметровых и миллиметровых длин волн. Измерения, выполняемые с борта искусственного спутника, дают возможность проводить круглосуточные измерения. Благодаря наличию в указанном диапазоне длин волн "окон прозрачности" атмосферы (излучение атмосферы по сравнению с излучением поверхности мало) принимаемое на спутнике излучение практически полностью связано с состоянием подстилающей поверхности и, что самое главное – обладает высокой информативностью.

Применительно к исследованиям водной поверхности информативность обусловлена высокой степенью корреляции характеристик радиотеплового излучения с физико-химическими, диэлектрическими свойствами воды и, в особенности, с ее геометрией. Геометрия поверхности океана определяется интенсивностью волнения, которое связано, в первую очередь, с ветровым воздействием на поверхность. Данный факт подтверждают как наземно-дистанционные исследования зависимости радиотеплового излучения от вектора приводного ветра, так и исследования, проводимые с помощью спутниковых приборов.

Для интерпретации получаемых спутниковых данных используются теоретические, эмпирические и комбинированные модели. Некоторые модели разрабатываются на основе теории переноса радиоизлучения, некоторые на основе экспериментальных данных, но все они созданы с целью установить взаимосвязь между геофизическими параметрами (температура воды и воздуха, скорость ветра и др.) и радиотепловым излучением от границы раздела океан-атмосфера. Также модели используются для изучения процессов протекающих в атмосфере и океане, например процессов энергообмена, зарождения тропических циклонов и многих других. Моделей, связывающих радиоизлучение от поверхности с геофизическими параметрами не много, и поэтому открытыми остаются следующие вопросы: насколько адекватно эти модели согласуются между собой, каковы точности этих моделей, насколько адекватно модели описывают данные экспериментов.

В настоящее время (январь 2018 года) в отделе "Исследование Земли из космоса" Института космических исследований РАН проводится этап эскизного проекта космического эксперимента "Конвергенция", который планируется провести на российском сегменте международной космической станции (РС МКС). Полное название проекта: «Определение детальных профилей температуры и влажности атмосферы при исследовании генезиса атмосферных катастроф». Целью КЭ «Конвергенция», является исследование механизмов генезиса и эволюции крупномасштабных кризисных атмосферных процессов типа тропических циклонов и среднеширотных ураганов как одних из основных элементов в формировании глобального массо- и влагообмена в системе океан-атмосфера, измерение абсолютных

радиоярких температур системы атмосфера-океан тропиков в диапазоне 6...220 ГГц, определение детальных профилей температуры и влажности атмосферы, проведение исследований по круглосуточному обнаружению вспышек молний, определение энергетических, пространственных и временных характеристик вспышек молний, определение зон грозовой деятельности.

Одной из задач КЭ «Конвергенция» является задача определения скорости и направления ветра по данным измерения собственного радиотеплового излучения водной поверхности. Проведение данного КЭ позволит отработать оптимальные алгоритмы восстановления скорости и направления приводного ветра, создать соответствующее программное обеспечение и провести валидацию результатов измерений путем сопоставления с независимыми метеорологическими данными и данными других датчиков. В результате выполнения эксперимента будут развиты модели и алгоритмы, предназначенные для восстановления полей скорости и направления ветра над поверхностью Мирового океана, собрана информация о динамике ветровых полей в районах формирования и развития циклонов и ураганов.

### ***Актуальность работы***

Исследование зависимости радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности от скорости и направления приповерхностного ветра, температуры воды, воздуха и других метеорологических и физических параметров является одной из ключевых задач, способствующих пониманию процессов, протекающих в системе океан-атмосфера. С другой стороны, определение поля приводного ветра с помощью микроволновых измерений из космоса позволяет исследовать глобальные климатические явления, прогнозировать стихийные бедствия и решать ряд других важных задач.

### ***Цель диссертационной работы***

Исследовать взаимосвязь собственного радиоизлучения взволнованной водной поверхности с полем приводного ветра в микроволновой области на частоте в 37,5 ГГц, а также разработать его многопараметрическую модель и предложить алгоритм дистанционного определения направления ветра на основе микроволновых измерений.

Конкретные *задачи*, решенные в диссертации:

1. Проведен анализ отечественной и зарубежной научной литературы посвященной вопросам исследования радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности в микроволновом диапазоне длин электромагнитных волн.
2. Найдены модели, с помощью которых описывается радиотепловое излучение взволнованной водной поверхности и выполняется анализ данных дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне.
3. Подготовлен и проведен натурный эксперимент по исследованию процессов протекающих в системе океан-атмосфера методами микроволновой радиометрии.
4. Выполнена серия электродинамических расчетов с использованием моделей микроволнового излучения взволнованной водной поверхности.
5. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными измерениями собственного излучения водной поверхности.
6. Разработана регрессионная многопараметрическая модель радиоизлучения взволнованной водной поверхности на частоте 37,5 ГГц.
7. Разработан алгоритм определения направления ветра с помощью многочастотных микроволновых радиополяриметрических измерений из космоса направленный на решение одной из задач планируемого КЭ "Конвергенция".

### ***Объект исследования***

Морская поверхность как граница раздела сред в системе океан-атмосфера.

### ***Предмет исследования***

Связь собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности в микроволновом диапазоне длин электромагнитных волн с полем приводного ветра и физической температурой воды.

***Научная новизна*** представленной диссертационной работы заключается в том, что впервые:

1. Проведен анализ экспериментальных радиополяриметрических данных на частоте 37,5 ГГц, полученных на океанографической платформе, принадлежит

федеральному государственному бюджетному учреждению науки "Черноморскому гидрофизическому полигону РАН" (ЧГП РАН), в период с 2005 по 2016 годы. В результате анализа установлена взаимосвязь между величиной радиационно-ветровой зависимости, скоростью ветра и температурой поверхности воды [Сазонов, Садовский, 2013; Сазонов и др., 2013; Сазонов, Кузьмин, 2014; Сазонов и др., 2016].

2. Проведено моделирование радиационно-ветровой зависимости собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности в рамках двухмасштабной модели волнения использующей спектр волнения в области гравитационно-капиллярных волн. В результате расчетов получены модельные оценки величины радиационно-ветровой зависимости собственного излучения взволнованной водной поверхности [Сазонов и др., 2014; Сазонов, Садовский, 2016].

3. Выполнено сравнение модельных расчетов и экспериментально измеренных значений радиационно-ветровой зависимости в рамках совместного корреляционного анализа и анализа невязок в широком диапазоне скоростей приводного ветра и вертикальных углов наблюдения. Результаты сравнения показали, что в большинстве случаев модельные расчеты сходятся с экспериментом, однако, количественные оценки свидетельствуют о том, что модели отличаются друг от друга и от натуральных измерений [Сазонов, 2015; Сазонов, 2017].

4. Разработана регрессионная модель собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности в микроволновом диапазоне длин волн на основе экспериментальных измерений радиационно-ветровой зависимости [Сазонов, 2017; Сазонов и др., 2018].

5. Разработан алгоритм определения направления ветра по спутниковым измерениям третьего параметра Стокса в двух полосах обзора микроволнового радиометра-спектрометра [Садовский, Сазонов, 2017; Стерлядкин и др., 2017; Кузьмин и др., 2017].

### ***Положения, выносимые на защиту***

1. Наличие значимой корреляции между экспериментально полученными и модельно рассчитанными значениями радиационно-ветровой зависимости свидетельствуют о том, что наблюдаемые особенности собственного излучения

взволнованной водной поверхности носят общий характер. При выполнении измерений с помощью микроволновых радиометров в любой акватории (море, океан, большое озеро) и с любой высоты (с платформы, самолета, спутника) следует ожидать аналогичные результаты.

2. Результаты обработки данных натуральных экспериментов демонстрируют сильную взаимосвязь между величиной радиационно-ветровой зависимости и скоростью ветра, температурой воды. Кроме того, величина радиационно-ветровой зависимости наименее чувствительна к влиянию переотраженного излучения атмосферы (по сравнению с радиояркостным контрастом), тем самым точнее описывает влияние геометрии поверхности (скорости ветра) на интенсивность собственного излучения водной поверхности.

3. Разработанная модель микроволнового излучения взволнованной водной поверхности **MiROSE-a** адекватно описывает результаты экспериментальных наблюдений в широком диапазоне углов наблюдения (как вертикальных, так и азимутальных), скоростей ветра и физических температур воды.

4. Применение разработанного алгоритма в КЭ "Конвергенция" позволит восстанавливать направление приводного ветра по многочастотным радиополяриметрическим измерения с точностями лучше, чем у зарубежных аналогов.

### ***Научная и практическая значимость работы***

Диссертация выполнялась в соответствии с научными планами ИКИ РАН в рамках государственного задания ФАНО РФ по теме «Мониторинг» «Разработка методов технологий спутникового мониторинга для научных исследований глобальных изменений и обеспечения безопасности» (Гос. рег. № 01.20.0.2.00164). Автор принимал также участие в выполнении работ в рамках проектов: грант Президента РФ № МК-865.2012.5; грант РФФИ № 15-05-08401; грант РФФИ № 14-05-00520; грант РФФИ № 14-02-00839. Предложенный в диссертации подход к анализу данных дистанционного зондирования морской поверхности в микроволновом диапазоне длин волн может быть использован для улучшения и дополнения применяемых алгоритмов обработки данных. Предложенная многопараметрическая модель микроволнового излучения взволнованной водной поверхности **MiROSE-a**



может быть применена для получения предварительных (экспресс) оценок скорости и направления ветра, температуры поверхности воды непосредственно в ходе экспериментальных измерений, которые будут использоваться для решения различных задач дистанционного зондирования. Предложенный алгоритм позволяет наиболее простым и физическим способом определять направления ветра по спутниковым радиополяриметрическим измерениям в двух полосах обзора сканирующей радиометрической систем.

Автор в 2015 году получил премию на XIII Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" за цикл работ по анализу экспериментальных данных; в 2016 году получил премию в номинации "Лучшая работа, выполненная молодыми учеными" в ИКИ РАН.

***Степень достоверности результатов проводимых исследований*** подтверждается: качественным и количественным совпадением экспериментально полученных зависимостей с модельными расчетами; сравнением результатов с результатами аналогичных исследований; применением математического моделирования для анализа большого объема натуральных данных и получение достоверных статистических оценок.

#### ***Апробация результатов***

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены автором в период с 2011 по 2017 год. Они докладывались на следующих отечественных и международных конференциях: Седьмая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2009); 9-я Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» с элементами научной молодежной школы ФРЭМЭ'2010 (Владимир-Суздаль, 2010); Восьмая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2010); Седьмая Конференция молодых ученых, посвященная Дню космонавтики «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (Москва, 2011); Девятая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного

зондирования Земли из космоса» (Москва, 2011); II Всероссийские Армандовские чтения. Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред (Муром, 2012); 10-я Международ. научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» с элементами научной молодежной школы ФРЭМЭ'2012 (Владимир-Суздаль, 2012); Десятая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2012); IX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвященная Дню космонавтики (Москва, 2012); X Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвященная Дню космонавтики (Москва, 2013); Одиннадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2013); XI Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвященная Дню космонавтики (Москва, 2014); Двенадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2014); Шестая международная Школа-семинар: «Спутниковые методы и системы исследования Земли». (Таруса, 2015); Тринадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2015); III всероссийская микроволновая конференция (Москва, 2015); Седьмая Школа-семинар: «Спутниковые методы и системы исследования Земли» (Таруса, 2016); 12-я Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» с элементами научной молодежной сессии ФРЭМЭ'2016 (Владимир-Суздаль, 2016); Четырнадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2016); Восьмая международная Школа-семинар: «Спутниковые методы и системы исследования Земли» (Таруса, 2017); Пятнадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2017); Семинары отдела 55 ИКИ РАН «Физические основы микроволнового зондирования» (Москва, 2012, 2013, 2014, 2016, 2017).

### ***Публикации по теме работы***

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены автором в период с 2011 по 2017 год. Основные результаты работы опубликованы, также они были представлены на российских и международных конференциях и отражены в 35 публикациях, среди которых 7 входят в перечень журналов рекомендованных ВАК, из них 6 работ индексируются в РИНЦ, 1 – в Scopus. Общий объем опубликованных работ составляет 14,25 печатных листов, из них 6,17 печатных листов принадлежат соискателю лично. Индекс Хирша в РИНЦ – 3.

### ***Личный вклад автора***

Результаты, изложенные в диссертации, получены автором самостоятельно или на равных правах с соавторами. Автор принимал участие; в постановке и проведение натурного эксперимента; в обработке экспериментальных данных; в тестировании разработанного в ИКИ радиометра поляриметра. Автору принадлежат: разработка программного комплекса для оценки радиационно-ветровой зависимости собственного излучения взволнованной водной поверхности; проведение модельных расчетов радиационно-ветровой зависимости; идея применения совместно корреляционного анализа и анализа невязок для сравнения модельных расчетов и экспериментальных данных; разработка программного комплекса для сравнения модельных расчетов и экспериментальных данных в рамках корреляционного анализа и анализа невязок; идея применения радиационно-ветровой зависимости для моделирования собственного излучения взволнованной водной поверхности; разработка программного комплекса для моделирования собственного излучения взволнованной водной поверхности; метод определения направления ветра по многочастотным радиополяриметрическим измерения из космоса в двух полосах обзора и разработка программного комплекса для определения направления ветра.

### ***Благодарности***

Выражаю глубокую признательность Евгению Александровичу Шаркову за ценные советы при планировании и проведении исследований, постоянное внимание к работе и чуткое научное руководство. Автор признателен Алексею Владимировичу

Кузьмину за помощь в проведении натуральных экспериментов, Садовскому Илье Николаевичу и Михаилу Николаевичу Поспелову за помощь в обработке и интерпретации экспериментальных данных, Стерлядкину Виктору Вячеславовичу за помощь при разработке алгоритма определения направления ветра. Автор выражает благодарность Наталье Юрьевне Комаровой за оказание помощи при подготовке текста диссертации, а также всем сотрудникам отдела №55 «Отдел исследований Земли из космоса» ИКИ РАН за поддержку в течение всего периода работы над диссертацией.

### *Структура и объем диссертации*

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и библиографии. В ней содержится 138 страниц, в том числе, 68 рисунков, 11 таблица. Библиография включает 85 наименований.

### *Краткое содержание работы*

Во **Введении** сформулирована цель работы и показана её актуальность, поставлены задачи, аргументирована научная новизна, сформулированы защищаемые положения, выносимые на защиту, показана достоверность и практическая значимость результатов работы.

**Первая глава** носит обзорный характер. В ней представлен аналитический обзор исследований радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности. Показаны основные результаты его исследования, как в натуральных, так и в лабораторных условиях. Описаны эксперименты, результаты которых открыли новые взаимосвязи между радиотепловым излучением водной поверхности и метеорологическими параметрами. Показаны методы описания радиационно-ветровой зависимости и азимутальной анизотропии. Приведен список основных микроволновых приборов спутникового базирования и показаны задачи, решаемые с помощью радиометрии.

На основании результатов исследований отечественных и зарубежных авторов отмечено, что радиотепловое излучение взволнованной водной поверхности в микроволновом диапазоне длин электромагнитных волн зависит от угла наблюдения,

поляризации принимаемого излучения и его частоты, а также физических параметров поверхности, таких как температура и соленость воды, и сильно коррелированно с ее геометрией. Геометрия взволнованной водной поверхности определяется, в основном, скоростью приводного ветра. Таким образом, скорость приводного ветра наряду с другими параметрами влияет на радиотепловое излучение взволнованной водной поверхности. Более того, радиотепловое излучение гладкой водной поверхности – изотропно, а при появлении ветра над поверхностью становится анизотропным. Данный эффект получил название: азимутальная анизотропия, и его величина зависит как от скорости ветра, так и от угла между направлением ветра (направлением волнения) и направлением зондирования, что дает уникальную возможность определять поле приводного ветра по радиополяриметрическим измерениям из космоса.

Таким образом, проведенный обзор позволил выделить актуальное направление исследований, а именно: определить взаимосвязь между собственным радиоизлучением взволнованной водной поверхности и полем приводного ветра, и поставить конкретные задачи исследования микроволнового излучения взволнованной водной поверхности на частоте 37,5 ГГц.

Во **второй** главе представлено исследование собственного излучения взволнованной водной поверхности в серии натуральных экспериментов по дистанционному зондированию водной поверхности с помощью радиометрических приемников микроволнового диапазона длин электромагнитных волн. В данной главе описаны: экспериментальные исследования, проведенные на океанографической платформе в Черном море; используемое научное оборудование; методика проведения эксперимента. Показана обработка экспериментальных данных, способ вычисления радиоярких температур, радиоярких контрастов и радиационно-ветровой зависимости. Представлено сравнение вычисленной на основе экспериментальных данных величины радиационно-ветровой зависимости с ее модельными значениями и экспериментальными данными, полученными другими исследователями. В главе показана методика исследования эффекта азимутальной анизотропии, а также ее сравнение с модельными расчетами и экспериментальными наземными, самолетными и спутниковыми измерениями.

Представленные во второй главе результаты экспериментальных исследований собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности на частоте в 37,5 ГГц от температуры воды и скорости/направления приводного ветра, а также их сравнение с модельными расчетами и результатами аналогичных экспериментов, позволили сделать следующие основные выводы:

- Измерения с океанографической платформы дают уникальную возможность исследовать связь собственного излучения взволнованной водной поверхности в микроволновом диапазоне с метеорологическими и океанологическими процессами, а также установить закономерности этой связи.
- Величина радиационно-ветровой зависимости наименее чувствительна к влиянию переотраженного излучения атмосферы (по сравнению с радиояркостным контрастом), тем самым точнее описывает влияние геометрии поверхности (скорости и направления ветра) на интенсивность собственного излучения водной поверхности.
- Величина азимутальной анизотропии, как по экспериментальным, так и по модельным данным возрастает как при увеличении угла наблюдения, так и при увеличении скорости ветра. При ветрах более 12 – 13 м/с величина анизотропии практически не изменяются, что объясняется наличием на поверхности пены и обрушений, которые гасят мелкомасштабное волнение.
- Хотя в большинстве случаев модельные расчеты сходятся с экспериментом, однако, количественные оценки свидетельствуют, что модели отличаются друг от друга и от натуральных измерений.

В **третьей главе** представлено моделирование радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности на основе экспериментальных измерений радиационно-ветровой зависимости и азимутальной анизотропии. Показана необходимость нормирования объясняющих переменных модели. Описаны этапы моделирования и составления регрессионных соотношений. Представлено сравнение разработанной модели **MiROSE-a** с экспериментальными данными (оценка точности аппроксимации в терминах коэффициента корреляции). Показан состав модели **MiROSE-a** для расчета азимутальных вариаций радиотеплового излучения,

радиояркостного контраста и радиояркостной температуры.

Представленные в данной главе результаты разработки модели микроволнового излучения взволнованной водной поверхности на частоте 37,5 ГГц, позволили сделать следующие основные выводы:

- Разработанная многопараметрическая модель микроволнового излучения взволнованной водной поверхности **MiROSE-a** адекватно (на качественном уровне) описывает результаты экспериментальных наблюдений в широком диапазоне углов наблюдения (как вертикальных, так и азимутальных), скоростей ветра и физических температур воды.
- Высокая степень корреляции между метеорологическими параметрами и интенсивностью радиоизлучения свидетельствует о наличии их сильной взаимосвязи, что дает возможность применять модельный расчет для восстановления скорости приводного ветра и температуры воды по угловым радиополяриметрическим измерениям.
- На качественном уровне модель анизотропии адекватно описывает результаты измерений и этого достаточно для экспресс оценки направления приводного ветра.

**Четвертая глава** посвящена разработке алгоритма определения направления ветра по многочастотным радиополяриметрическим измерениям собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности. Предлагаемый алгоритм планируется использовать при обработке данных в будущем проекте КЭ "Конвергенция".

Предлагаемый алгоритм определения направления ветра основан на измерении третьего параметра Стокса с одной и той же поверхности под разными азимутальными углами наблюдения. Принцип работы алгоритма заключается в сравнении двух измеренных значений третьего параметра Стокса с его модельной азимутальной зависимостью.

В данной главе приведено теоретическое обоснование возможности определения направления ветра по измерениям в двух полосах обзора микроволнового радиометра-спектрометра (МИРС) и разработан метод повышения надежности определения

направления ветра. Решена тестовая задача восстановления направления ветра и оценены погрешности предлагаемого метода. На рисунке 1 приведен результат решения тестовой задачи по восстановлению направления ветра. Также приведена величина ошибки между исходным и восстановленным направлением ветра.

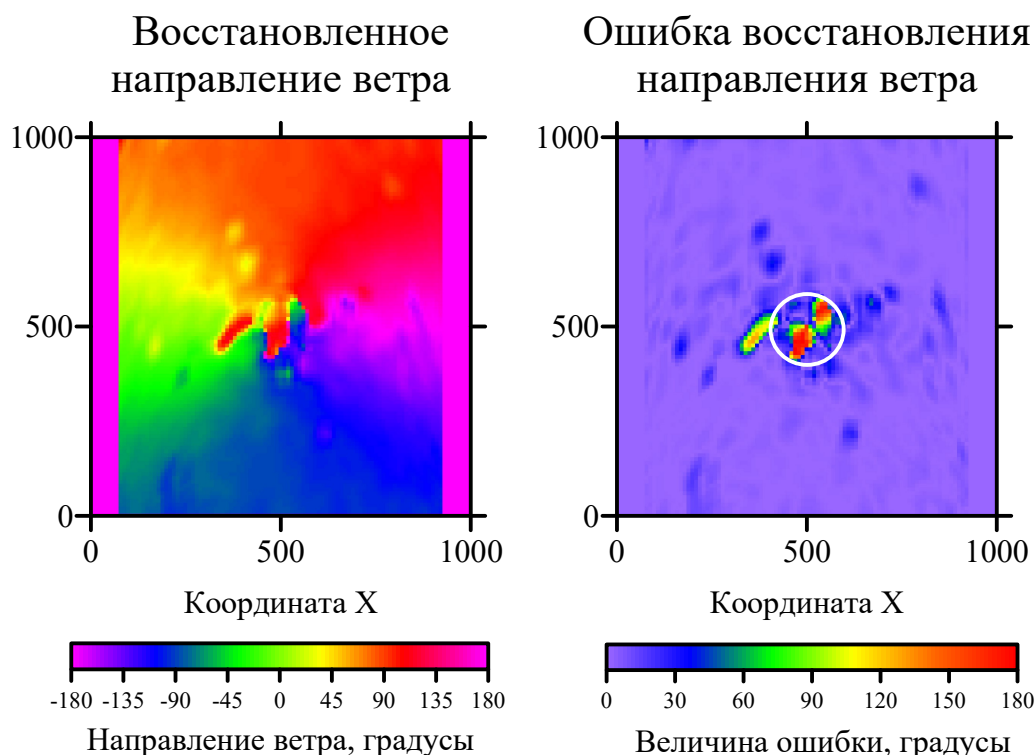


Рисунок 1. Результаты восстановления направления ветра по трем частотам (тестовая задача). Белым обозначена область, в которой скорость ветра менее 3 м/с.

Для получения численных оценок был проведен расчет среднего значения восстановленного направления ветра и его среднеквадратическое отклонение. Расчет выполнен для всех точек, в которых скорость ветра больше 3 м/с

По представленным на рисунках 2 и 3 статистическим расчетам можно сказать, что: во-первых, корреляция между исходным и восстановленным средним направлением ветра составила 0,9995; во-вторых, СКО только в ~8% случаев превышает уровень  $20^\circ$  и в ~20% случаев превышает уровень  $10^\circ$ . Таким образом, если геофизические параметры системы океан-атмосфера будут определены достаточно точно, то ошибка восстановления направления ветра при скоростях более 3 м/с в 80% случаев не превысит  $\pm 10^\circ$ , что в настоящее время как минимум в два раза лучше, чем у существующих алгоритмов и методов.



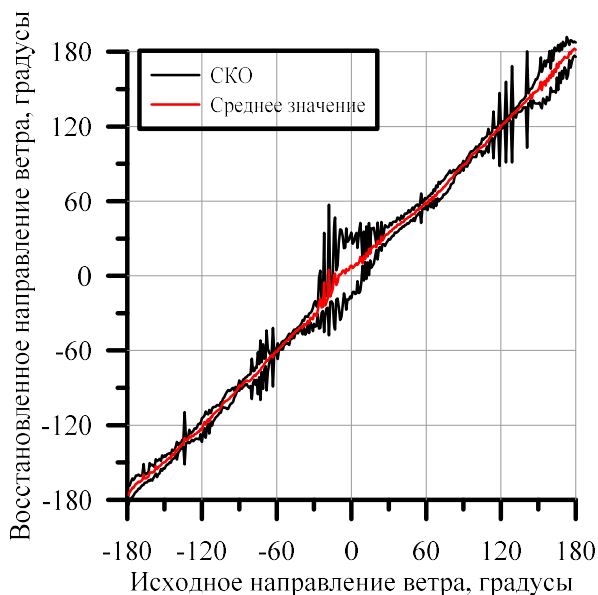


Рисунок 2. Корреляция между исходным и восстановленным направлением ветра, а также СКО.

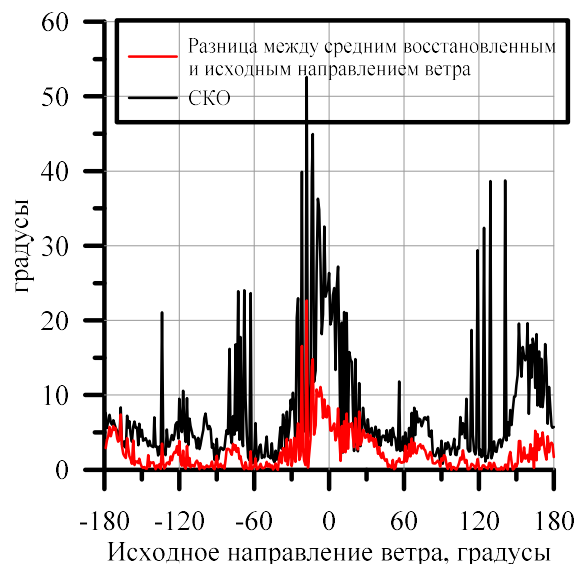


Рисунок 3. Ошибка определения направления ветра.

Также в **четвертой главе** показан пример восстановления поля ветра на основе спутниковых измерений прибором WindSat. Предварительно откалиброванные и привязанные к координатам данные измерений прибора WindSat, а также данные о телеметрии спутника и углах наблюдения (environmental data record) были взяты с интернет-ресурса: <http://www.ifremer.fr/opendap/cerdap1/oceanflux/satellite/11/coriolis/-windsat> в формате NetCDF (Version 2.0). Данные о температуре поверхности, скорости ветра, паросодержании, интенсивности осадков, капельной влаге взяты в виде карт, расположенных на сайте: <http://data.remss.com/windsat/>. Для тестирования алгоритма определения направления ветра были взяты данные за 27 апреля 2007 года.

Результаты представлены на рисунке 4 в виде цветных векторных карт направления ветра, цвет соответствует скорости ветра. По представленным картам видно, что есть области, где определенное направление ветра коррелировано с данными предлагаемыми на сайте <http://www.remss.com/missions/windsat/>, однако есть области, где расхождение достаточно сильное.

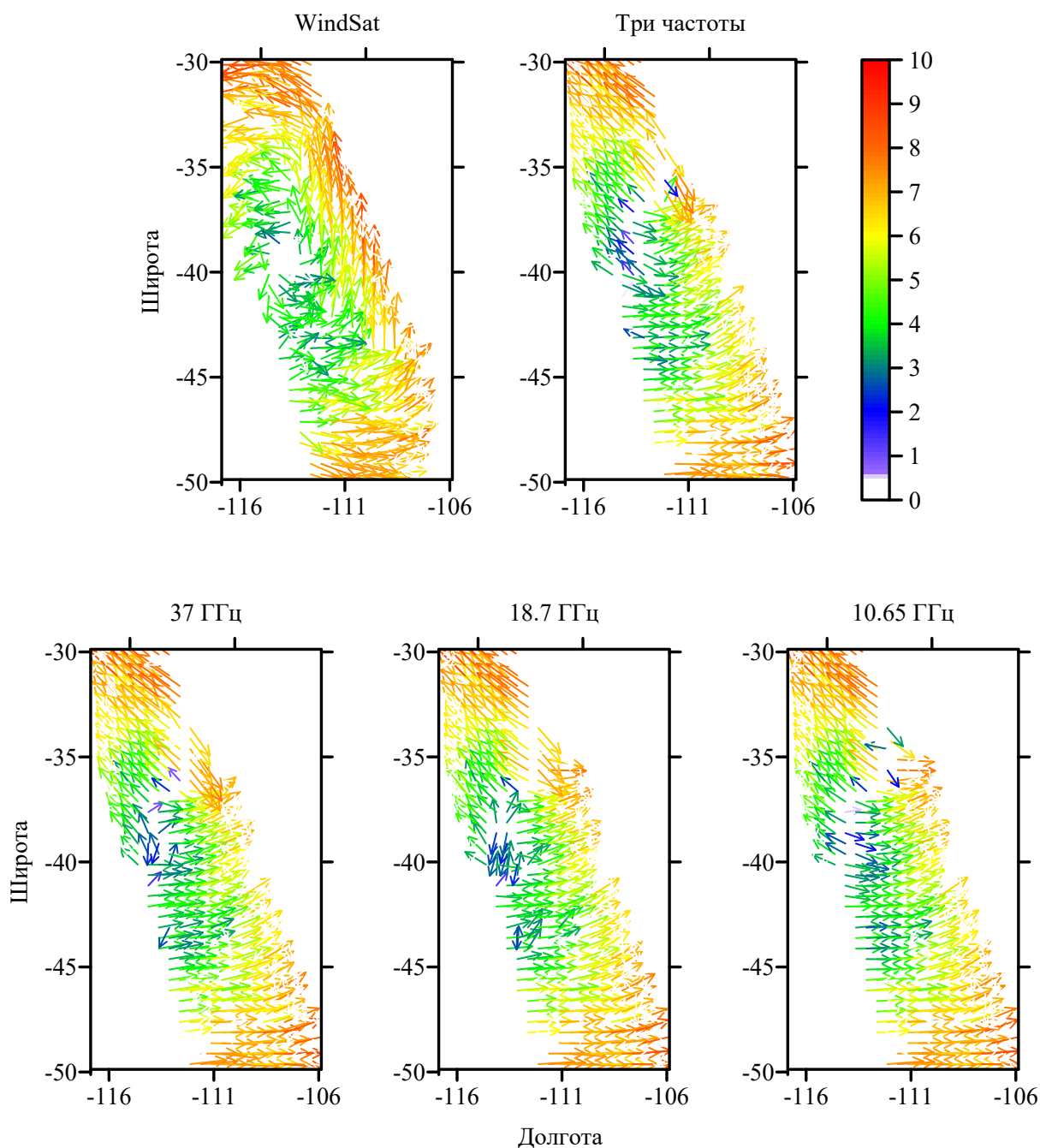


Рисунок 4. Результаты восстановления направления ветра по измерениям третьего параметра Стокса прибором WindSat.

Представленные в данной главе результаты разработки алгоритма определения направления ветра по измерениям из космоса, позволили сделать следующие выводы:

- Разработан алгоритм определения направления ветра по спутниковым радиополяриметрическим измерениям в микроволновом диапазоне длин волн. В основе предложенного алгоритма лежит эффект азимутальной анизотропии, с помощью которого можно по двум азимутальным измерениям на одной частоте восстановить направление ветра.

- Решение тестовой задачи показало, что если геофизические параметры системы океан-атмосфера будут определены достаточно точно, то ошибка восстановления направления ветра при скоростях более 3 м/с в 80% случаев не превысит  $\pm 10^\circ$ , что в настоящее время как минимум в два раза лучше чем у существующих алгоритмов и методов.
- Демонстрация работоспособности предложенного алгоритма на данных спутникового радиометра WindSat показало, что поле ветра восстановлено достаточно адекватно, как при использовании радиометрических наблюдений на одной частоте, так и при совместных многочастотных измерениях. Показано, что даже без специальных методов коррекции восстановленного направления ветра можно получить картину поля ветра, в общем, соответствующую продуктам, предлагаемым компанией "Remote Sensing Systems" [<http://www.remss.com/>].

В **Заключении** приведены основные результаты работы, которые подтверждают основные защищаемые положения диссертационного исследования:

1. Анализ работ, посвященный вопросам теоретических и экспериментальных исследований собственного восходящего излучения взволнованной водной поверхности и применения радиометрических приборов спутникового базирования для глобального мониторинга состояния системы океан-атмосфера показал, что экспериментальные исследования проводятся в полном диапазоне вертикальных углов наблюдения (от надира до настильных углов), однако подавляющая часть наблюдений сосредоточена вблизи углов 45–55 градусов и 65 градусов. Такой интерес к указанным диапазонам углов наблюдений вызван особенностями изменения радиоизлучения вследствие ветрового воздействия на поверхность, поэтому большинство радиометрических приборов микроволнового диапазона космического базирования располагаются именно под таким наклоном к поверхности.

2. Большой объем тщательно обработанных и проанализированных экспериментальных данных радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности позволили составить статистически значимые оценки изменения радиоизлучения от таких метеорологических параметров как скорость ветра и температура поверхности воды. Результаты обработки данных натурных

экспериментов демонстрируют сильную взаимосвязь между величиной радиационно-ветровой зависимости и скоростью ветра, температурой воды. Кроме того, величина радиационно-ветровой зависимости наименее чувствительна к влиянию переотраженного излучения атмосферы (по сравнению с радиояркостным контрастом), тем самым точнее описывает влияние геометрии поверхности (скорости ветра) на интенсивность собственного излучения водной поверхности.

3. Моделирование, проведенное на основе двухмасштабной модели волнения, использующей модели спектра морского волнения, и эмпирической модели, построенной на основе многолетнего анализа спутниковых данных, показало, что расчетные значения радиационно-ветровой зависимости сильно отличаются между моделями. Сравнение эксперимента и модели показало, что большинстве случаев модельные расчеты сходятся с экспериментом на качественном уровне, однако, количественные оценки свидетельствуют об обратном.

4. Сравнение экспериментальных измерений радиационно-ветровой зависимости с аналогичными экспериментами по изучению радиотеплового излучения водной поверхности показало, что результаты, полученные в разных акваториях и при разных пространственных масштабах, совпадают на качественном уровне.

5. Разработанная многопараметрическая модель микроволнового излучения взволнованной водной поверхности **MiROSE** (*Microwave Rough Ocean Surface Emission model*) адекватно описывает результаты наблюдений на частоте 37,5 ГГц (длина волны ~8 мм) в диапазоне следующих условий: вертикальный угол наблюдения 30 – 80 градусов, температура воды 12,5 – 25°C и скорость ветра 3 – 13 м/с. Показатели корреляции между экспериментальными данными и модельными расчетами составляют: 0,66 для горизонтальной поляризации и 0,82 для вертикальной поляризации. На основе разработанной модели можно рассчитать (усредненные по азимуту) угловую зависимость приращения яркостной температуры от приращения скорости ветра, радиояркостный контраст и радиояркостную температуру.

6. Разработанное дополнение модели **MiROSE-a** (анизотропия) описывает результаты наблюдений азимутальной анизотропии на вертикальной и горизонтальной поляризациях при частоте 37,5 ГГц (длина волны ~8 мм) в диапазоне следующих условий: вертикальный угол наблюдения 0 – 65 градусов и скорость ветра 0 – 20 м/с.

Показатели корреляции между экспериментальными данными и модельными расчетами составляют: 0,68 для вертикальной поляризации и 0,4 для горизонтальной поляризации.

7. Предложенная многопараметрическая модель микроволнового излучения взволнованной водной поверхности **MiROSE-a** может быть применена для получения предварительных (экспресс) оценок скорости и направления ветра, температуры поверхности воды непосредственно в ходе экспериментальных измерений, которые будут использоваться для решения различных задач дистанционного зондирования.

8. Разработан и протестирован алгоритм определения направления ветра с помощью многочастотных микроволновых радиополяриметрических измерений из космоса. Предложенный алгоритм и метод повышения надежности показали, что во-первых, корреляция между исходным и восстановленным средним направление ветра составила 0,9995; во-вторых, СКО только в ~8% случаев превышает уровень 20° и в ~20% случаев превышает уровень 10°. Таким образом, если геофизические параметры системы океан-атмосфера будут определены достаточно точно, то ошибка восстановления направления ветра при скоростях более 3 м/с в 80% случаев не превысит  $\pm 10^\circ$ , что в настоящее время как минимум в два раза лучше, чем у существующих алгоритмов и методов.

#### **Список публикаций в российских журналах, входящих в перечень ВАК:**

1. **Анискович В.М., Кузьмин А.В., Сазонов Д.С., Хайкин В.Б.** Радиометр-поляриметр диапазона 0,8 см для натуральных и лабораторных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса».2016, Т. 13, № 2, С. 213–223.
2. **Садовский И.Н., Шарков Е.А., Кузьмин А.В., Сазонов Д.С., Пашинов Е.В.** Обзор моделей комплексной диэлектрической проницаемости водной среды, применяемых в практике дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса.2014, № 6, с. 79–92.
3. **Сазонов Д.С., Кузьмин А.В., Садовский И.Н.** Экспериментальные исследования зависимости интенсивности радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности от скорости приводного ветра // Исслед. Земли из космоса. 2016, №1-2, С. 25-34.
4. **Садовский И.Н., Кузьмин А.В., Пospelов М.Н., Сазонов Д.С., Пашинов Е.В.** Экспериментальные исследования коротковолновой части спектра ветровых волн. Предварительный анализ результатов дистанционных радиометрических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 55–67

5. **Сазонов Д.С.** Корреляционный анализ экспериментальных дистанционных измерений и моделей микроволнового излучения взволнованной водной поверхности. // Исслед. Земли из космоса. 2017. №3. С. 53-64.
6. **Сазонов Д.С.** Моделирование микроволнового излучения взволнованной морской поверхности на основе экспериментальных данных. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. 271-287.
7. **Sazonov D. S., Kuzmin A. V., Sadovsky I. N.** Experimental Studies of Thermal Radiation Intensity Dependence on Near-Water Wind Speed for Rough Sea Surface, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, Vol. 52, No. 9, pp. 911–919. ISSN 0001-4338. DOI: 10.1134/S0001433816090218

#### **Список публикаций в трудах международных конференций:**

1. **Сазонов Д.С., Садовский И.Н.** Исследование влияния характеристик антенных систем на результаты радиополяриметрических измерений в СВЧ диапазоне. // 9 я Международ. научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» с элементами научной молодежной школы ФРЭМЭ'2010: Труды конференции. Владимир, 2010. С. 494-498.
2. **Сазонов Д.С., Садовский И.Н.** Подбор функций распределения вероятности для описания распределения уклонов взволнованной водной поверхности // 10 я Международ. научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» с элементами научной молодежной школы ФРЭМЭ'2012: Труды конференции. Владимир, 2012. Т3. С. 170-175.
3. **Сазонов Д.С., Садовский И.Н.** Микроволновое излучение взволнованной водной поверхности. Сравнение экспериментальных данных и моделей // 12 я Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» с элементами научной молодежной сессии ФРЭМЭ'2016: Труды конференции. Владимир-Суздаль, 2016, Т2, С.198-202.

#### **Список публикаций в трудах конференций:**

1. **Сазонов Д.С., Садовский И.Н.** Оценка влияния Солнца как точечного источника излучения на результаты радиополяриметрических измерений. // Седьмая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 55.
2. **Сазонов Д.С., Садовский И.Н.** Калибровка как часть обработки экспериментальных радиополяриметрических измерений. // Восьмая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2010, С. 232.
3. **Сазонов Д.С.** Общий алгоритм определения параметров ветровых гравитационно-капиллярных волн по данным угловых радиополяриметрических измерений. // Седьмая Конференция молодых ученых, посвященная Дню космонавтики «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2011 г. С. 71.
4. **Сазонов Д.С.** Восстановление спектра ветрового волнения на основе данных натурных волнографических измерений. // Девятая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2011. С. 289.
5. **Сазонов Д.С., Садовский И.Н.** Использование метода наименьших квадратов и последовательных приближений для ускорения калибровки СВЧ-радиометра // Десятая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2012. С. 64.

6. **Сазонов Д.С., Садовский И.Н.** Исследование статистических характеристик распределения уклонов взволнованной водной поверхности // IX Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвященная Дню космонавтики: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2012. С. 72.
7. **Сазонов Д.С., Садовский И.Н.** Исследование ветровой зависимости коэффициентов азимутальной анизотропии на основе экспериментальных данных // X Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвященная Дню космонавтики [Электронный ресурс]: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2013.
8. **Сазонов Д.С., Садовский И.Н., Чечина Е.В., Смоллов В.Е.** Исследование асимметрии распределения уклонов крупных волн в экспериментах CAPMOS // Одиннадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2013. С. 263.
9. **Сазонов Д.С., Кузьмин А.В., Садовский И.Н.** Исследование азимутальной зависимости собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности в природных условиях // Одиннадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2013. С. 264.
10. **Садовский И. Н., Сазонов Д. С., Пашинов Е. В.** Рекомендации по выбору модели КДП для решения задач дистанционного зондирования акваторий на частотах 9,5; 35,5; 47,78 и 75,5 ГГц // Одиннадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2013. С. 262.
11. **Анискович В. М., Кузьмин А. В., Сазонов Д. С.** Радиометр-поляриметр диапазона 0,8 см для природных и лабораторных измерений // Одиннадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2013. С. 123.
12. **Сазонов Д.С., Кузьмин А.В., Садовский И.Н.** Сравнение экспериментальных исследований зависимости радиотеплового излучения водной поверхности от скорости приводного ветра с модельными расчетами // XI Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвященная Дню космонавтики [Электронный ресурс]: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2014. С. 88.
13. **Сазонов Д.С., Кузьмин А.В.** Исследование радиационно-ветровой зависимости собственного радиотеплового излучения водной поверхности на частоте 37,7 ГГц // Двенадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2014. С. 279.
14. **Сазонов Д.С.** Исследование радиационно-ветровой зависимости восходящего излучения морской поверхности на основе экспериментальных данных //Тринадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2015. С. 307.
15. **Сазонов Д.С.** Корреляционный анализ крутизны радиационно-ветровой зависимости радиоизлучения взволнованной водной поверхности // Тринадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2015. С. 308.
16. **Сазонов Д.С.** Анализ экспериментальных и модельных оценок микроволнового излучения взволнованной водной поверхности // III всероссийская микроволновая конференция Тез. докл. М.: ИРЭ РАН, 2015.

17. **Сазонов Д.С.** Излучение взволнованной водной поверхности как функция от угла визирования, скорости ветра и температур воды и воздуха // Четырнадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2016. С. 286.
18. **Сазонов Д.С.** Моделирование радиоизлучения взволнованной водной поверхности в микроволновом диапазоне // XIV Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», посвященная Дню космонавтики [Электронный ресурс]: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2017.
19. **Садовский И.Н., Сазонов Д.С.** Применение нейронной сети в задаче восстановления спектра ветровых гравитационно-капиллярных волн // Пятнадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 55.
20. **Сазонов Д.С.** Регрессионная модель пространственного микроволнового радиоизлучения от граничного слоя океан-атмосфера // Пятнадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 56.
21. **Сазонов Д.С.** Азимутальная изменчивость радиоизлучения взволнованной водной поверхности на основе измерений в микроволновом диапазоне // Пятнадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 287.
22. **Кузьмин А.В., Пашинов Е.В., Садовский И.Н., Сазонов Д.С., Стерлядкин В.В., Хапин Ю.Б., Шарков Е.А.** Научная аппаратура космического эксперимента «Конвергенция» на РС МКС // Пятнадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 460.
23. **Садовский И.Н., Сазонов Д.С.** Определение модуля скорости приповерхностного ветра по данным многочастотного радиометра-спектрометра МИРС // Пятнадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 464.
24. **Сазонов Д.С.** Алгоритм определения интенсивности осадков по спутниковым измерениям в микроволновом диапазоне // Пятнадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 465.
25. **Стерлядкин В.В., Сазонов Д.С., Пашинов Е. В., Кузьмин А.В.** Описание алгоритма определения направления поверхностного ветра по радиометрическим измерениям из космоса // Пятнадцатая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2017. С. 468.