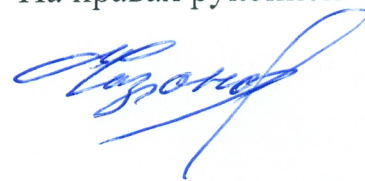


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской академии наук

На правах рукописи



Сазонов Дмитрий Сергеевич

**Многопараметрическая модель радиотеплового
излучения взволнованной морской поверхности:
анализ спутниковой информации и надводных измерений**

Специальность 01.04.03 «Радиофизика»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Научный руководитель д-р физ.-мат.наук, профессор Шарков Е.А.

Москва 2018

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. РАДИОПОЛЯРИМЕТРИЯ ВЗВОЛНОВАННОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	15
1.1. Микроволновые измерения взволнованной водной поверхности.....	15
1.1.1. Радиационно-ветровая зависимость микроволнового излучения взволнованной водной поверхности	24
1.2. Исследования микроволнового излучения взволнованной водной поверхности из космоса.....	34
1.3. Радиометрические приборы космического базирования.....	37
1.4. Космический эксперимент «Конвергенция»	41
1.5. Радиометрия в других задачах	43
1.6. Выводы по главе 1	44
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-ВЕТРОВОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОБСТВЕННОГО РАДИОТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЗВОЛНОВАННОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	47
2.1. Обзор натурального эксперимента.....	47
2.1.1. Экспериментальные исследования на океанографической платформе.....	47
2.1.2. Используемое научное оборудование	48
2.1.3. Техника выполнения эксперимента	52
2.2. Обработка экспериментальных данных	57
2.3. Выводы по главе 2	76
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ВЗВОЛНОВАННОЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	78
3.1. Модель радиационно-ветровой зависимости	80
3.1.1. Угловая зависимость.....	80
3.1.2. Ветровая зависимость	82

3.1.3. Температурная зависимость.....	82
3.1.4. Регрессионная модель микроволнового излучения взволнованной водной поверхности	84
3.1.5. Корреляционное соответствие: модель-эксперимент.....	85
3.2. Модель азимутальной анизотропии.....	87
3.2.1. Азимутальная зависимость	87
3.2.2. Ветровая зависимость.....	87
3.2.3. Угловая зависимость.....	89
3.2.4. Регрессионная модель микроволнового излучения взволнованной водной поверхности с учетом эффекта азимутальной анизотропии.....	90
3.2.5. Корреляционное соответствие: модель - эксперимент.....	91
3.3. Выводы по главе 3	93
ГЛАВА 4. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРА ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ В КЭ «КОНВЕРГЕНЦИЯ».....	95
4.1. Теоретическое обоснование возможности определения направления ветра	95
4.2. Повышение надёжности измерений за счёт использования различных частотных каналов.....	98
4.3. Решение тестовой задачи определения направления ветра	101
4.4. Восстановление направления ветра по спутниковым измерениям	111
4.5. Выводы по главе 4	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	121
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ И АНАЛИЗ НЕВЯЗОК.....	130
П1.1. ПОСТАНОВКА ГИПОТЕЗ H_0 И H_1 ОБ ОТСУТСТВИИ И НАЛИЧИИ ЗНАЧИМОЙ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ И МОДЕЛЬНЫМИ РАСЧЕТАМИ	130
П1.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НЕВЯЗКИ МЕЖДУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ И МОДЕЛЬНЫМИ РАСЧЕТАМИ	132

ВВЕДЕНИЕ

В середине XX века благодаря технологическому развитию дистанционное наблюдение Земли стало отдельным направлением научных исследований. Пройдя длинный путь развития от фотографических систем до мультимедийных сканеров и зондировщиков дистанционное зондирование Земли стало одним из эффективных инструментов наблюдения и изучения нашей планеты. Также неоспоримым преимуществом 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 полюса, 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 в области мониторинга состояния поверхности нашей планеты и в исследованиях процессов ее взаимодействия с атмосферой непрерывно растет. 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 искусственных спутников, дают возможность проводить круглосуточный мониторинг. Благодаря наличию в указанном диапазоне длин волн «окон прозрачности» атмосферы (излучение атмосферы по сравнению с излучением поверхности малó) 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 с использованием 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 модели соответствуют данным экспериментов?

В настоящее время (январь 2018 г.) в отделе «Исследование Земли из космоса» Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) проводится этап эскизного проекта космического эксперимента (КЭ) «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 океан-атмосфера 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.

Таким образом, 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, принадлежащей Федеральному государственному бюджетному учреждению науки «Черноморский гидрофизический полигон РАН» (ЧГП РАН), в период с 2005 по 2016 г. В результате анализа установлена взаимосвязь между радиационно-ветровой зависимостью, скоростью ветра и температурой поверхности воды.
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 (ГКВ). В результате расчетов получены модельные оценки радиационно-ветровой зависимости собственного излучения взволнованной водной поверхности.
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, что модели отличаются друг от друга и от натуральных измерений.

4. Разработана регрессионная модель собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности в микроволновом диапазоне длин волн на основе экспериментальных измерений радиационно-ветровой зависимости.
5. Разработан алгоритм определения направления ветра по спутниковым измерениям третьего параметра Стокса в двух полосах обзора микроволнового радиометра-спектрометра.

Положения, выносимые на защиту

1. Наличие значимой корреляции между экспериментально полученными и модельно рассчитанными значениями радиационно-ветровой зависимости свидетельствуют, 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 радиационно-ветровой зависимостью и скоростью ветра, температурой воды. Кроме того, радиационно-ветровая зависимость 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 измерениям с точностью лучше, чем у зарубежных аналогов.

Научная и практическая ценность 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; гранты РФФИ № 15-05-08401, 14-05-00520, 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 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 системы.

Автор в 2015 г. получил премию на XIII Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» за цикл работ по анализу экспериментальных данных; в 2016 г. 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 аналогичными исследованиями; применением математического моделирования для анализа большого объема натурных данных и получение достоверных статистических оценок.

Апробация результатов

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены автором в период с 2011 по 2017 г. 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 Международная 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 г. 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 проведении натурных экспериментов; 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 совместного применения 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 измерениям 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 Наталии 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 таблиц. Библиография включает 85 наименования.

Во *введении* обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы её цели и приведены основные научные положения и результаты, выносимые на защиту.

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.

Вторая глава посвящена обработке экспериментальных радиометрических измерений. В ней описаны экспериментальные исследования, проведенные на океанографической платформе, используемое научное оборудование, методика проведения эксперимента. Показана обработка экспериментальных данных, способ вычисления радиоярких температур, радиоярких контрастов и радиационно-ветровой зависимости. Представлено сравнение модельных расчетов с экспериментальными измерениями радиационно-ветровой зависимости и показано, что, несмотря на значимую корреляцию между модельными и экспериментальными данными они достаточно сильно различаются. Также в данной главе приведено сравнение модельных и экспериментальных величин азимутальной анизотропии радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности. Сделаны основные выводы, что в большинстве случаев модельные расчеты сходятся с экспериментом, однако, количественные оценки свидетельствуют, что модели отличаются друг от друга и от натуральных измерений.

Третья глава посвящена моделированию 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 с экспериментальными данными (оценка точности аппроксимации в терминах коэффициента корреляции). Приведены соотношения для расчета азимутальных вариаций радиотеплового излучения, радиояркого контраста и радиояркой температуры.

Четвертая глава посвящена разработке алгоритма определения направления ветра по многочастотным радиополяриметрическим измерениям собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности в КЭ «Конвергенция». 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. Показан пример восстановления поля ветра на основе спутниковых измерений прибором WindSat.

Заключение содержит основные результаты работы.

В *приложении 1* представлена постановка гипотез **H₀** и **H₁** об отсутствии и наличии значимой корреляции между экспериментальными данными и модельными расчетами. Выполнен расчет величины невязки между экспериментальными данными и модельными расчетами. Приведены результаты совместного корреляционного анализа и анализа невязок между модельными и экспериментальными значениями радиационно-ветровой зависимости.

ГЛАВА 1. Радиополяриметрия взволнованной водной поверхности

1.1. Микроволновые измерения взволнованной водной поверхности

Теоретическая зависимость микроволнового излучения от состояния водной поверхности (скорости ветра) была разработана Стогриным [Stogryn, 1967]. Однако измерения излучения водной поверхности, существовавшие в то время, такие как измерения Нордберга [Nordberg et al., 1968] и Вильямса [Williams, 1969] были недостаточны для построения функциональной зависимости от частоты, поляризации, вертикального угла.

Поэтому первыми измерениями собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности в радиодиапазоне при контролируемых метеоусловиях можно считать измерения, выполненные с платформы “*ArgusIsland*” в марте и апреле 1969 г. и марте 1970 г. Сама платформа находится на 45 км юго-западнее Бермудских островов, глубина в районе платформы 60 м. Измерения проводились на частотах 8,36 и 19,34 ГГц в диапазоне скоростей ветра от 0 до 10 м/с. Приборы были размещены на высоте 20 м от поверхности воды [Hollinger, 1970, 1971].

В ходе данного эксперимента восходящее излучение (антенная температура) регистрировалось на вертикальной и горизонтальной поляризациях. Вертикальный угол наблюдения изменялся с шагом 5 и 10°. Измеренные значения антенной температуры были скорректированы для учета переотражения атмосферы от поверхности и для излучения, попавшего в боковые лепестки диаграммы направленности (ДН) антенны. Данная процедура проводилась с целью получения яркостной температуры, усредненной по главному лепестку ДН. На рисунке 1.1 представлены результаты, полученные Холлингером [Hollinger, 1970] для вертикальной и горизонтальной поляризаций. На данных графиках также изображены результаты расчета для гладкой водной поверхности (сплошная линия).

Основным результатом данной работы стала демонстрация того, что угловая зависимость радиояркостной температуры в сравнении с расчетом гладкой водной поверхности показала ожидаемый результат. Для вертикальной поляризации характерна независимость излучения при угле приблизительно 55° (см. рисунок 1.1), увеличение излучения до данного угла и уменьшение излучения после при возрастании скорости ветра. Для горизонтальной поляризации отмечено, что интенсивность излучения увеличивается при возрастании скорости ветра в диапазоне углов от 15 до 75° с большим

увеличением в области настильных углов наблюдения. Полученные Холлингером результаты являются экспериментальным подтверждением предсказаний Стогриня [Stogryn, 1967].

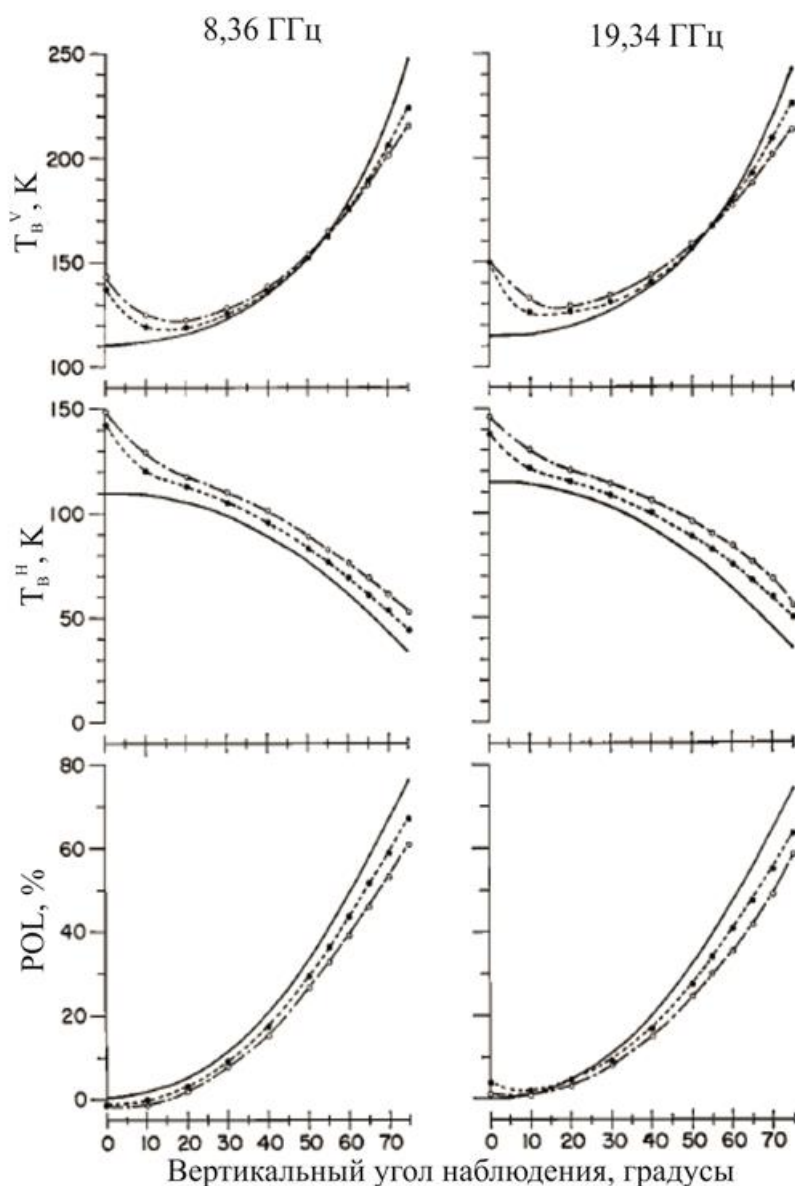


Рисунок 1.1 — Вертикальная и горизонтальная компоненты яркостной температуры моря и процент поляризации (определяемый как отношение разницы двух компонент к их сумме) на частотах 8,36 и 19,34 ГГц как функция от вертикального угла наблюдения для двух групп измерений, выполненных на минимально и максимально зарегистрированной скорости ветра. Точки представляют измерения при средней скорости ветра 1,6 м/с; кружки — при скорости ветра 7,4 м/с; сплошная линия — расчеты для гладкой водной поверхности

В работе [Van Melle et al., 1973] описаны лабораторные исследования различных факторов, влияющих на свойства поверхности океана, регистрируемые микроволновым радиометром. Результаты проведенных экспериментов демонстрируют, что вклад пленок и брызг в тепловое излучение поверхности менее важен, чем вклад пены и волн. На

рисунке 1.2 представлен эффект влияния направления волн на изменение яркостной температуры для горизонтальной поляризации. Оказалось, что увеличение температуры для волн, бегущих параллельно направлению зондирования, в два раза больше, чем для волн, направление которых перпендикулярно (позже данный эффект получит название «эффект азимутальной анизотропии», однако в работе [Van Melle et al., 1973] он не был исследован). Наблюдение подобного эффекта говорит о необходимости проведения аккуратных экспериментальных исследований данного феномена в условиях, позволяющих контролировать значительное число параметров, таких как амплитуда и частота волн.

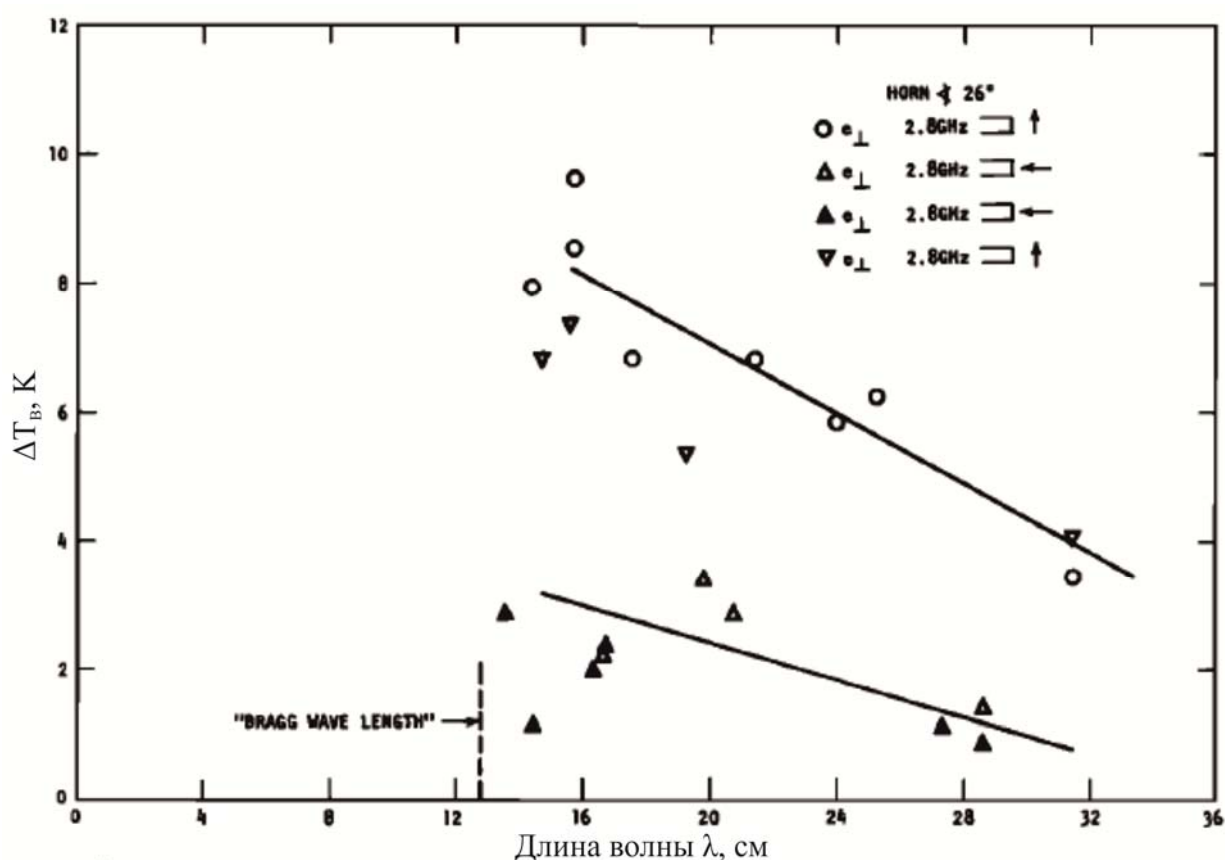


Рисунок 1.2 — Антенная температура в зависимости от длины волны [Van Melle et al., 1973]

Основным заключением работы [Van Melle et al., 1973] является то, что большой разброс в данных и неконтролируемые параметры проведенных экспериментов являются причиной невозможности применить результаты исследований к морской поверхности, но они демонстрируют необходимость тщательных исследований представленных эффектов как важнейший аспект радиометрических измерений температуры моря.

Большое исследование с самолета радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности описано в работе [Webster et al., 1976]. Данный эксперимент был

поставлен в Беринговом море, а основное исследование было направлено на определение частотного характера вариаций яркостной температуры от скорости ветра при полностью развитом волнении. Измерение водной поверхности осуществлялось при угле в 38° от надира на длинах волн 21; 6; 2,8; 1,55; 0,95 и 0,81 см. По результатам измерений были построены линии аппроксимации зависимости яркостной температуры от скорости ветра для каждой частоты. Наклон линии представлен на рисунке 1.3.

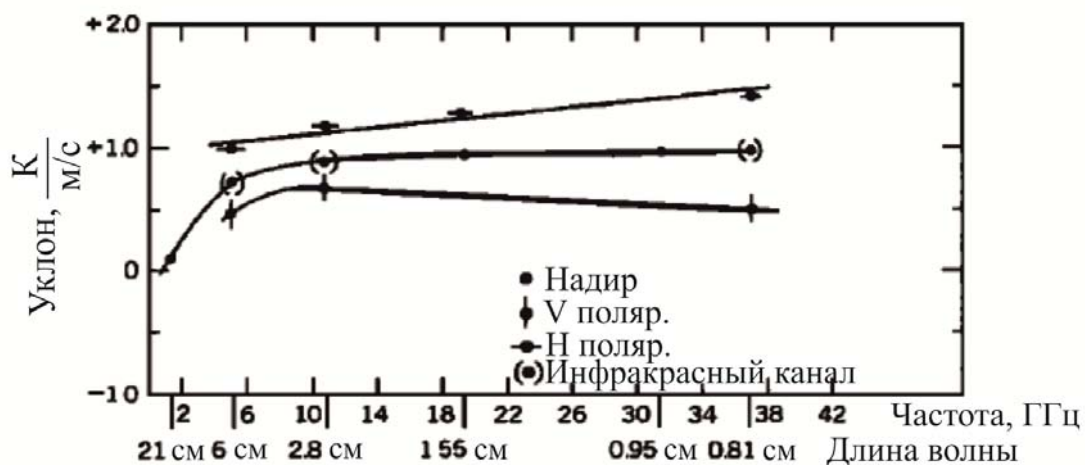


Рисунок 1.3 — Яркостная температура как функция от скорости ветра: уклон от частоты [Webster et al., 1976]

Условное значение наклона аппроксимации наблюдений в надир (точки в скобках на рисунке 1.3) получено как среднее значение наблюдений на горизонтальной и вертикальной поляризациях. Данные, полученные при измерении в надир (настоящие и условные), показывают, что существует очень маленькая чувствительность к изменению яркостной температуры от скорости ветра на длине волны 21 см. Чувствительность возрастает с уменьшением длины волны до 2,8 см, и предполагается постоянной для длины волны от 2,8 до 0,81 см. Представленные кривые на данном рисунке рассчитаны по модели [Wilheit, 1975].

Результаты измерений, описанные Вебстером [Webster et al., 1976], показали один интересный момент, видный на рисунке 1.3 — это увеличение разницы в чувствительности к скорости ветра между горизонтальной и вертикальной поляризациями с ростом частоты. Увеличение в чувствительности к скорости ветра на горизонтальной поляризации было спрогнозировано с помощью расчетов [Wu, Fung, 1972]. Уменьшение чувствительности на вертикальной поляризации связано с увеличением излучения гладкой водной поверхности. Данный результат привел к идее определять скорость ветра на основе дистанционных измерений.

В 1970-х гг. отечественными учеными был проведен большой эксперимент по исследованию радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности. Исследования проводились с самолетов-лабораторий Ил-18 и Ил-14 при помощи радиометров (миллиметровых и сантиметровых длин волн) и скаттерометра (длина волны 3 см) над различными акваториями с разной степенью волнения [Беспалова и др., 1979, 1982]. В результате экспериментов было показано, что для определения направления волнения и, следовательно, направления ветра необходимо проводить поляризационные измерения излучения водной поверхности.

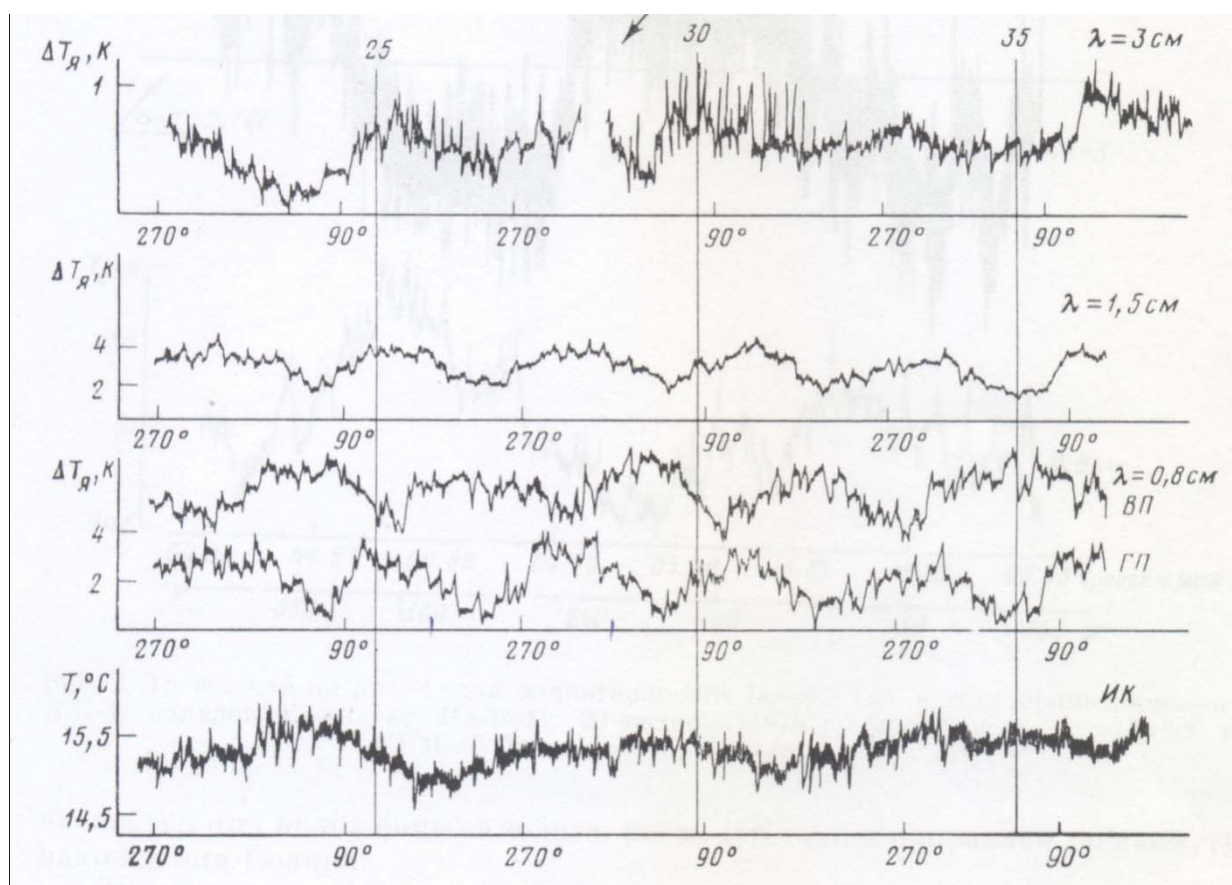


Рисунок 1.4 — Записи комплекса радиометров на борту Ил-14. $\lambda = 0,8$ см (две ортогональные поляризации), 1,5 см, 3 см, 8–10 мкм (ИК). 10 октября 1978 г., Японское море. Высота полета 300 м, состояние поверхности моря 4 балла, скорость ветра 10–12 м/с, направление 130° [Беспалова и др., 1982]

На рисунке 1.4 представлены регистрограммы радиометрических сигналов при выполнении самолетами виражей в Японском море в условиях однородного волнения. Анализ данных показал, что максимум радиотеплового излучения соответствует условиям коллинеарности векторов E и скорости ветра. Это хорошо видно для каналов 0,8 и 1,5 см. Наблюдаемые вариации при виражах по ИК-каналу связаны с подсветом Солнца. Более того, было установлено, что эффект азимутальной анизотропии связан именно с

гравитационно-капиллярной частью спектра морского волнения, которая определяется мгновенным значением скорости приводного ветра. Анизотропия растет с увеличением скорости ветра и убывает с увеличением длины волны.

Основным выводом исследований [Беспалова и др., 1979, 1982] является то, что эффект азимутальной анизотропии является общим (наблюдается как в морях и океанах, так и в закрытых водоемах) и может быть использован для измерения скорости приводного ветра, а так же для дистанционных исследований нелинейных взаимодействий при волнении моря.

Кроме измерений азимутальной анизотропии, выполненных в надир, были также проведены исследования и на настильных углах наблюдения [Гречко и др., 1991]. В результате было установлено, что, во-первых, величина анизотропии для настильных углов наблюдения больше, чем для надирных, и, во-вторых, яркостная температура меньше при наблюдении в направлении «по» или «против» приповерхностного ветра, чем в случае «перпендикулярно» направлению ветра. Проведенные модельные расчеты показали хорошее согласие между теоретическими и экспериментальными данными, и что именно гравитационно-капиллярные волны участвуют в формировании анизотропии, как на настильных, так и на надирных углах наблюдения.

Важной вехой в натуральных исследованиях микроволнового излучения водной поверхности как активными, так и пассивными методами дистанционных наблюдений стал совместный комплексный российско-американский эксперимент JUSREX'92 (The Joint United States / Russia international Waves Remote Sensing Experiment) [Кузьмин и др., 2015]. Главная цель эксперимента заключалась в исследовании взаимосвязи между параметрами спектра шероховатости морской поверхности, величиной обратного рассеяния радиолокационного сигнала и радиояркостной температурой в микроволновом диапазоне при различных метеорологических условиях и стратификации приводного слоя атмосферы. Другая цель эксперимента JUSREX'92 заключалась в сравнении радиометрических, радарных, оптических и контактных методов исследования океана.

В данном эксперименте с российской стороны принимали участие самолет-лаборатория Ту-134сх и научно-исследовательское судно «Академик Иоффе», с американской стороны — самолеты-лаборатории P-3 и DC-8 [Gasparovic, Etkin, 1994].

В результате эксперимента JUSREX'92 было получено большое количество радиометрических и радиолокационных данных, а также продемонстрировано, какой мультипликативный эффект может дать их комбинированное применение при дистанционном зондировании поверхности океана. Одним из важных результатов в области радиометрии стал вывод, что степень поляризации микроволнового теплового

излучения водной поверхности зависит не только от скорости ветра, но и от стабильности приводного слоя атмосферы.

Одним из относительно недавних больших подспутниковых экспериментов стал эксперимент Fluxes, Air-Sea Interaction, and Remote Sensing (FAIRS), проведенный на плавающей платформе R/P Floating Instrument Platform (FLIP) в южно-восточной части Тихого океана осенью 2000 г. [Aziz et al., 2005]. Платформа FLIP дрейфовала в течение 27 дней. Радиометрические измерения производились радиометрами с частотами 10,8 ГГц (поляризации: вертикальная, горизонтальная, $\pm 45^\circ$, левая и правая) и 37 ГГц (поляризации: вертикальная, горизонтальная, $\pm 45^\circ$). Наблюдения проводились на трех вертикальных углах 45, 53 и 65° при 9–12 равноудаленных друг от друга азимутальных углах в пределах от 145 до 355° относительно направления ветра.

Частью результатов обработки экспериментальных данных, описанных в работе [Aziz et al., 2005], являются линейные аппроксимации коэффициентов излучения E_W взволнованной водной поверхности. Экспериментальные значения коэффициентов излучения находились по формуле $E_W = (T_{A,W} - T_{SKY}) / (T_W - T_{SKY})$, где $T_{A,W}$ — измеренная антенная температура на соответствующей поляризации; T_W — температура поверхности воды, равная $289,5 \pm 0,5$ К на всем протяжении эксперимента; T_{SKY} — измеренная антенная температура атмосферы. В графическом виде коэффициенты излучения E_W приведены на рисунке 1.5.

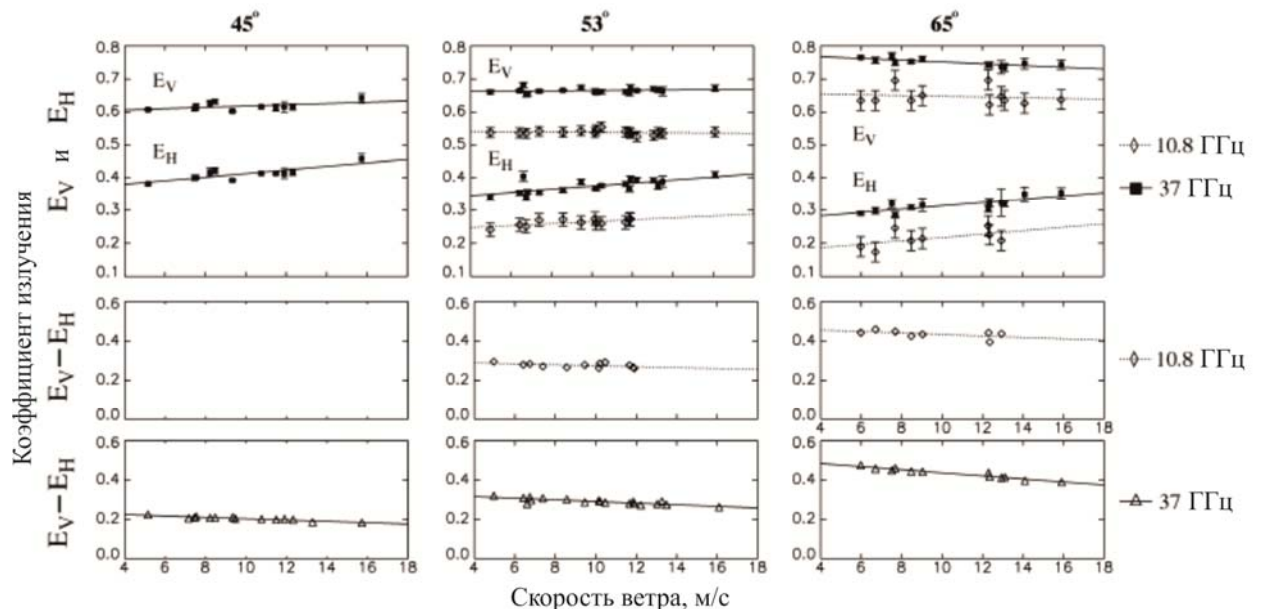


Рисунок 1.5 — Измеренная излучательная способность (E_V и E_H) водной поверхности для вертикальной и горизонтальной поляризаций на частотах 10,8 и 37 ГГц как функция от скорости ветра для трех вертикальных углов наблюдения (45, 53 и 65°) (вверху). Разница между E_V и E_H для частоты 10,8 ГГц (посередине). Разница между E_V и E_H для частоты 37 ГГц (внизу). Скорость ветра измерена на высоте 10 м [Aziz et al., 2005]

В данной работе коэффициент излучения E сравнивается с измерениями Холлингера [Hollinger, 1970] и Вебстера [Webster et al., 1976]. Сделан вывод об их хорошем сходстве. Однако, по мнению автора, выбор линейной аппроксимации неудачен, так как в тех же работах [Hollinger, 1970; Webster et al., 1976; Wentz, 1997] показано, что зависимость коэффициентов излучения E нелинейная и, следовательно, зависимость яркостной температуры от скорости приводного ветра тоже нелинейная.

Эксперименты в Крыму и Геленджике

В 1999 г. коллективом исследователей из ИКИ РАН был освоен экспериментальный полигон Южного отделения института океанологии (ЮО ИО) РАН вблизи г. Геленджика. На данном полигоне были возобновлены систематические экспериментальные исследования в области радиофизических методов зондирования морской поверхности [Булатов и др., 2003].

На данном полигоне были выполнены работы по апробации методики измерения пространственных спектров ветрового волнения — метода нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии [Ирисов и др., 1987; Kuzmin et al., 2000]. Кроме того, на этом полигоне были выполнены исследования влияния дождя на характеристики излучения морской поверхности [Bulatov et al., 2000] и проведены подспутниковые измерения, демонстрирующие возможность исследования вихревых структур и обнаружения нефтяных загрязнений малого масштаба [Kravtsov et al., 2000].

Начиная с 2005 г. экспериментальным полигоном стала океанографическая платформа ЧГП РАН (Черноморский гидрофизический полигон РАН), расположенная около южного берега полуострова Крым вблизи пос. Кацивели [Кузьмин и др., 2009]. На этой платформе были проведены комплексные исследования характеристик взаимодействия океана и атмосферы в рамках международного научного проекта CAPMOS (Combined Active / Passive Microwave Measurements of Wind Waves for Global Ocean Salinity Monitoring). В проекте приняли участие восемь научных групп из четырех стран — России, Украины, Италии и Дании.

Эксперименты на океанологической платформе были продолжены в 2007, 2009, 2012 и 2016 гг., но уже российскими учеными из ИКИ РАН, ИФА РАН, ИРЭ РАН. Это позволило накопить уникальный банк данных радиополяриметрических измерений взволнованной морской поверхности для обширного набора метеоусловий и условий волнообразования. Благодаря этому, ученым ИКИ РАН удалось значительно продвинуться в реализации уникального метода НРПС (метод нелинейной радиотепловой

резонансной спектроскопии) [Садовский, 2007; Садовский, 2008а, 2008б; Садовский и др., 2009], а его использование при обработке радиометрической информации позволило не только восстанавливать пространственный спектр ветровых ГКВ, но и отслеживать динамику отдельных спектральных компонент на фоне меняющихся метеоусловий [Садовский, Сазонов, 2010; Sadovsky et al., 2009].

Лабораторные эксперименты в ИКИ РАН

В ИКИ РАН на протяжении двух десятилетий ведутся лабораторные исследования гравитационно-капиллярных волн (ГКВ). Именно эти волны вносят определяющий вклад в приращение излучательной способности водной поверхности и отвечают за ее пространственную неоднородность (эффект азимутальной анизотропии) при малых скоростях ветра. Эти эксперименты направлены на всестороннее изучение резонансного характера излучения мелкомасштабных поверхностных волн, получившего название «критических явлений», которое тоже было открыто в ИКИ РАН [Гершензон и др., 1986; Кравцов и др., 1978; Трохимовский, Эткин, 1985].

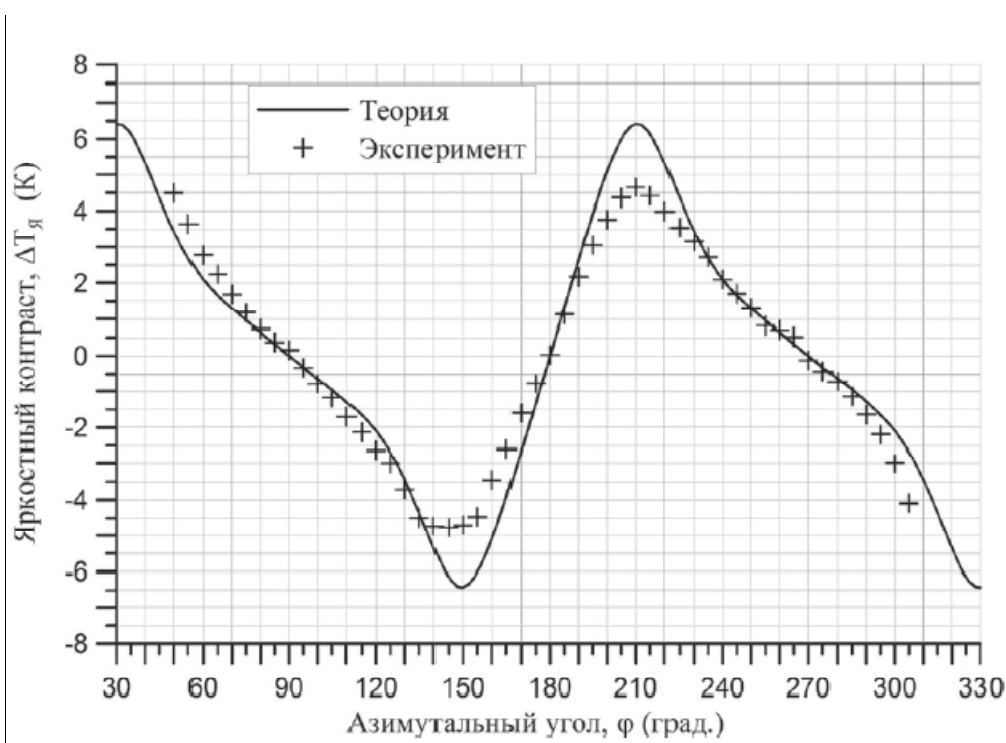


Рисунок 1.6 — Зависимость приращения третьего модифицированного параметра Стокса возмущенной поверхности от азимутального угла при вертикальном угле зондирования 20° . Крестики — эксперимент, сплошная линия — модельный расчет

В настоящее время основное внимание экспериментов уделяется повышению достоверности и точности проводимых измерений. С помощью разработанной установки

[Trokhimovskii et al., 2003] возможно получение постоянной во времени так называемой «замороженной» структуры на поверхности воды. Данная установка позволяет создавать на поверхности неровности с переменными амплитудой и периодом.

Усовершенствования установки позволили перейти от качественной демонстрации основных положений теории «критических явлений» к получению количественных оценок данного явления (рисунок 1.6). Более того, в работе [Садовский, 2007] разработана методика восстановления параметров спектра волнения в гравитационно-капиллярном интервале по данным угловых радиополяриметрических измерений на основе двухмасштабной модели волнения.

1.1.1. Радиационно-ветровая зависимость микроволнового излучения взволнованной водной поверхности

Обычно для исследования ветровой зависимости интенсивности собственного излучения взволнованной водной поверхности используется понятие радиояркостного контраста, который является разницей яркостных температур, измеренных при наличии и в отсутствии волнения (при условии неизменности физических параметров системы океан-атмосфера). В открытом океане крайне редки случаи абсолютного штиля и, следовательно, провести измерения для условий гладкой водной поверхности достаточно сложно. В качестве альтернативы можно использовать расчетные значения данной величины, вычисленные по известной физической модели излучения. Однако использование в процессе обработки данных каких-либо модельных аппроксимаций неизменно влечет за собой снижение качества экспериментального материала. Величины радиояркостных контрастов составляют несколько градусов и погрешности, обусловленные некорректным выбором той или иной модели (например, модели комплексной диэлектрической проницаемости или модели подсвета атмосферы), могут привести к кардинальным изменениям в получаемых результатах.

Поэтому целесообразно исследовать крутизну радиационно-ветровой зависимости $\partial T_{\text{я}}/\partial W$ [Трохимовский и др., 1999]. Ее определение проще, чем измерения радиояркостного контраста по отношению к гладкой водной поверхности. В то же время крутизна радиационно-ветровой зависимости определяется по регрессии радиояркостной температуры и скорости приповерхностного ветра без проведения абсолютных измерений и без использования каких-либо моделей для диэлектрических свойств воды.

Для вычисления $\partial T_{\text{я}}/\partial W$ необходимо определить разницу радиояркостных температур, измеренных при различных скоростях приповерхностного ветра:

$$\frac{\partial T_{\text{я}}}{\partial W} = \frac{T_{\text{я}}(W + \Delta W) - T_{\text{я}}(W)}{\Delta W}, \text{ где } \Delta W \text{ — приращение скорости ветра, взятое равным 1 м/с.}$$

Если радиояркие температуры получены при одинаковых метеоусловиях (за исключением интенсивности ветрового потока), постоянные составляющие регистрируемого излучения (например, величина подсвета атмосферы, излучение гладкой водной поверхности) сокращаются, позволяя отслеживать изменения в радиотепловом излучении, связанные исключительно с состоянием водной поверхности (интенсивностью волнения и скоростью ветра).

Чтобы обобщить измерения для всех углов наблюдения, в работе Холлингера [Hollinger, 1971] были выполнены аппроксимации для ветровых зависимостей на каждом угле наблюдения по методу наименьших квадратов и наклоны линий были построены как функция от угла (рисунок 1.7).

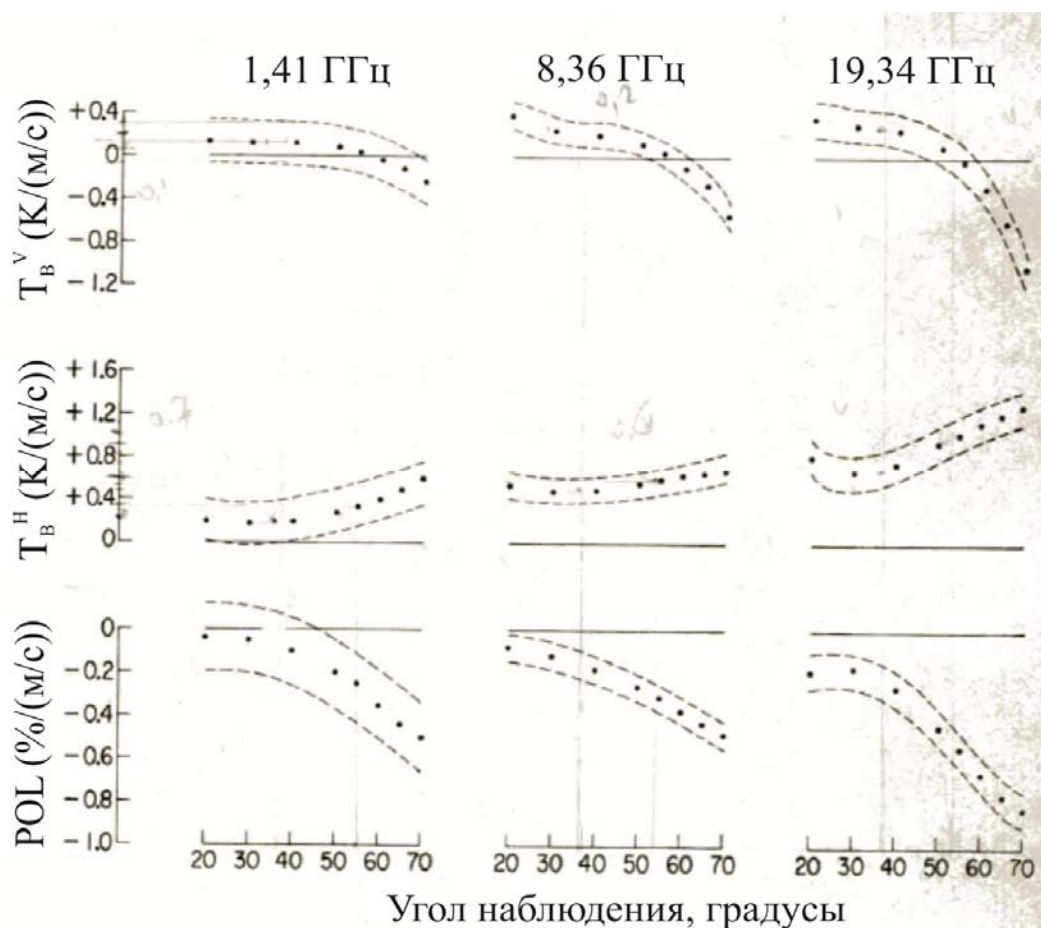


Рисунок 1.7 — Аппроксимация измерений на вертикальной и горизонтальной поляризации и поляризационная разность на каждом вертикальном угле наблюдения. Пунктирная линия — ошибка определения наклона [Hollinger, 1971]

Работа [Sasaki et al., 1987] стала одной из первых и наиболее известных попыток собрать и подвергнуть совместному анализу экспериментальные данные по радиационно-

ветровым зависимостям. Это оказалось затруднительным делом в силу того, что эксперименты были проведены на разных частотах, углах наблюдения, при разных метеоусловиях и на разной высоте от поверхности (платформы, самолеты, спутники). Кроме того, часть данных находилась только в графическом виде.

Крутизна радиационно-ветровой зависимости от угла наблюдения, представленная в работе [Sasaki et al., 1987], показана на рисунке 1.8. Отмечено, что на вертикальной поляризации чувствительность к скорости ветра уменьшается с увеличением угла наблюдения и становится отрицательной при углах более 50–60°. На горизонтальной поляризации нет ярко выраженной угловой зависимости $\partial T_{\text{я}}/\partial W$.

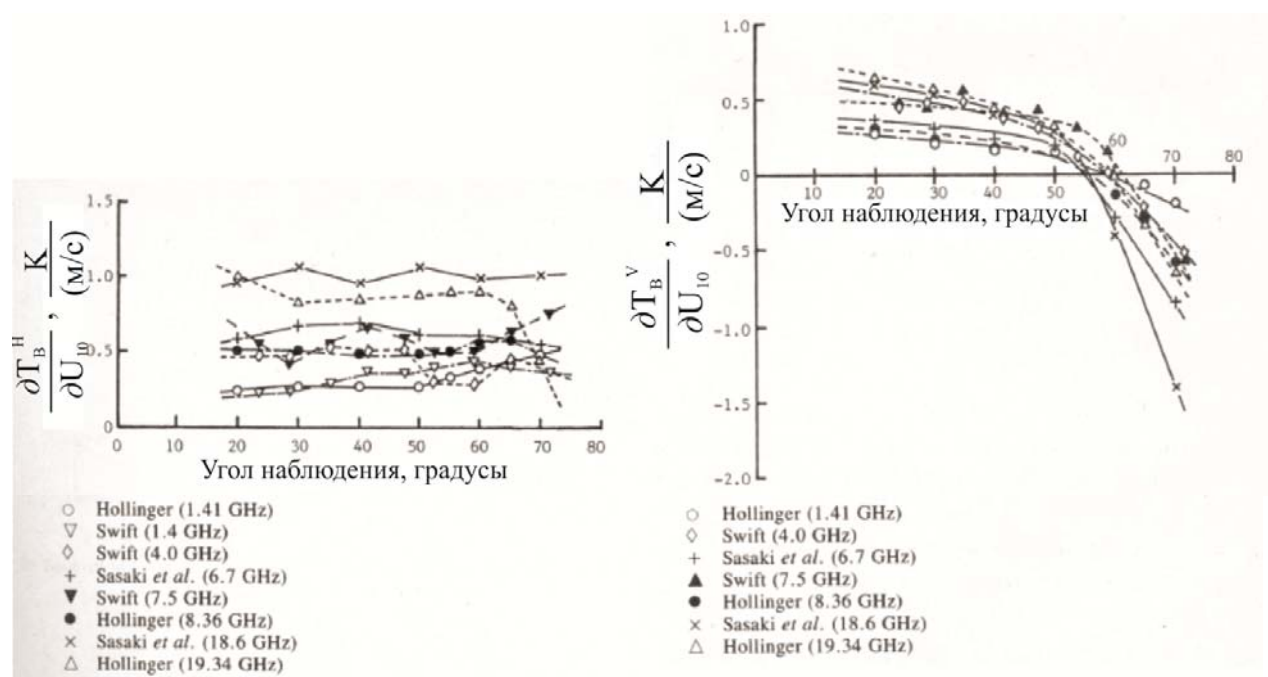


Рисунок 1.8 — Угловые зависимости приращения излучения от скорости ветра для вертикальной и горизонтальной поляризаций на разных частотах [Sasaki et al., 1987]

На рисунке 1.9 представлена крутизна радиационно-ветровой зависимости от частоты при различных углах наблюдения, и на рисунке 1.10 — для надирного угла. Из графиков видно, что абсолютная чувствительность излучения поверхности к скорости ветра увеличивается с ростом частоты принимаемого излучения, однако чувствительность на горизонтальной поляризации больше.

К основным выводам, сделанным в работе [Sasaki et al., 1987], относятся: свойства в излучении поверхности в диапазоне частот от 1 до 40 ГГц сильно зависят от скорости ветра и частоты для горизонтальной поляризации, и отмечена сильная угловая зависимость вертикальной поляризации излучения.

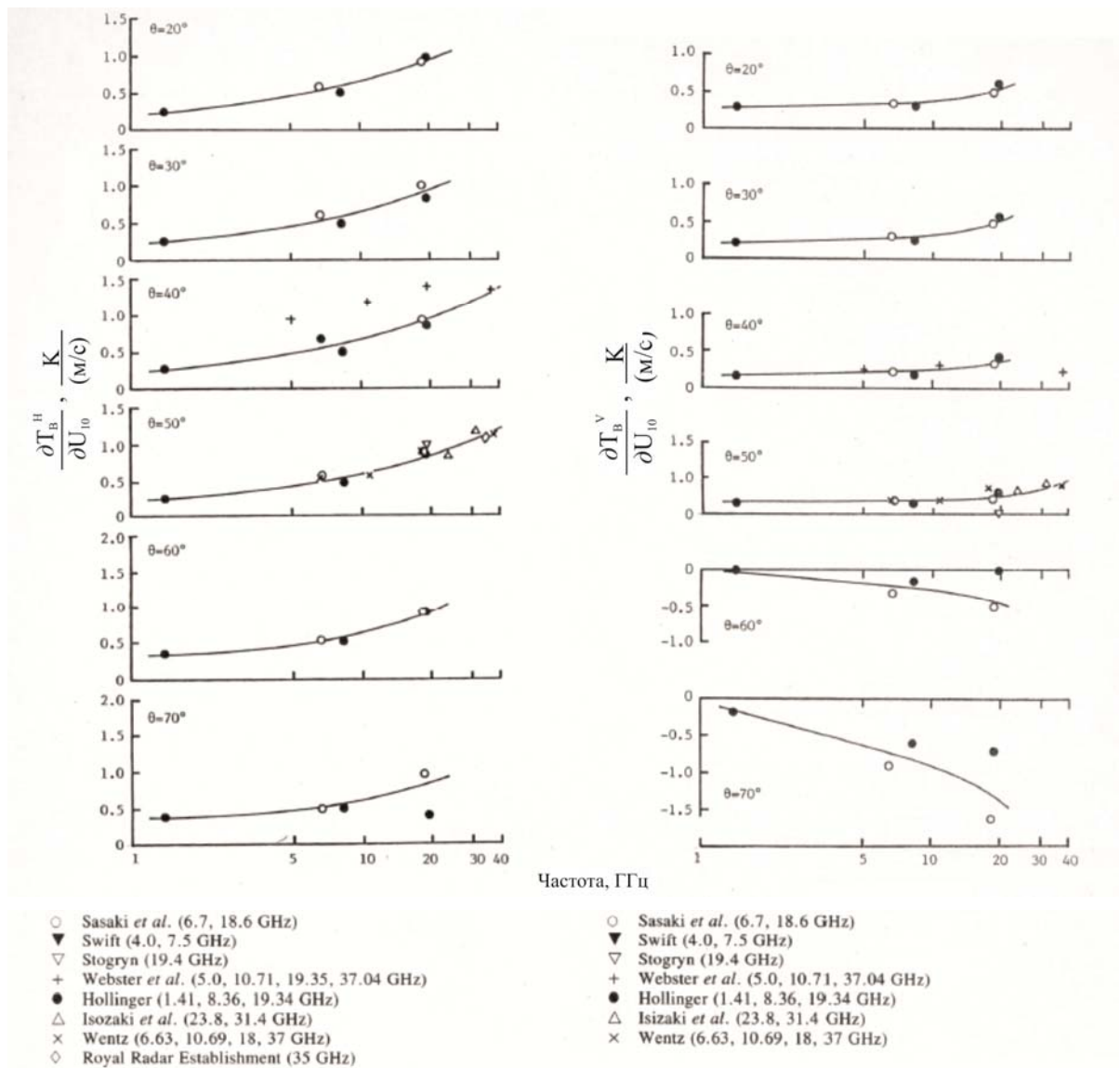


Рисунок 1.9 — Угловые и частотные зависимости приращения излучения от скорости ветра для вертикальной и горизонтальной поляризаций [Sasaki *et al.*, 1987]

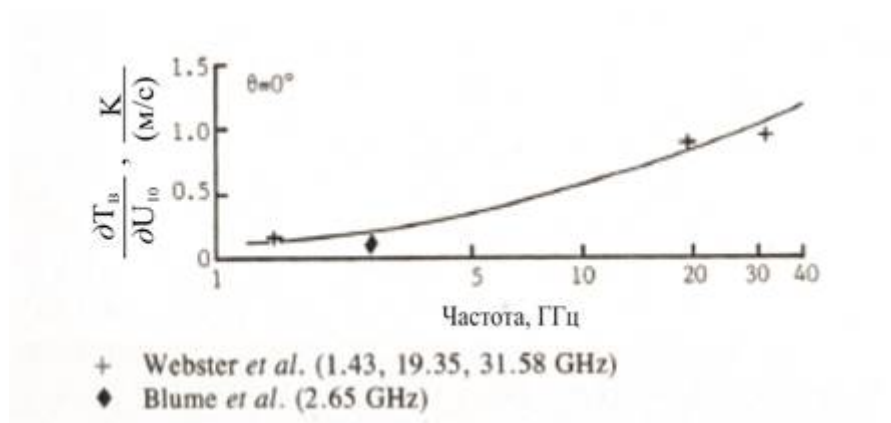


Рисунок 1.10 — Частотная зависимость приращения излучения от скорости ветра при надирном угле наблюдения [Sasaki *et al.*, 1987]

Представленные в работе [Sasaki et al., 1987] материалы ограничены диапазоном скорости ветра 1–15 м/с. Также отмечено, что собранные данные имеют разброс по географическим и сезонным характеристикам, что отсутствуют сведения о состоянии океана и атмосферы, что методика усреднения плохо описана, и что данные не отображают наличия температурной зависимости радиационно-ветровой характеристики.

1.1.2. Азимутальная анизотропия микроволнового излучения взволнованной водной поверхности

Собственное радиотепловое излучение взволнованной водной поверхности в значительной степени изотропно. Несмотря на это существует небольшая добавка в виде анизотропного излучения, которая зависит как от скорости ветра, так и от угла между направлением ветра (направлением волнения) и направлением зондирования. Эта добавка получила название «эффект азимутальной анизотропии».

Впервые эффект азимутальной анизотропии был обнаружен в 70-х гг. XX века в ходе проводившихся в ИКИ экспериментов по радиотепловому зондированию морской поверхности с борта самолета-лаборатории при помощи размещенных на нем различных радиометрических систем с антеннами, установленными в надир [Беспалова и др., 1982]. Эффект азимутальной анизотропии заключается в зависимости измеренной радиояркостной температуры от угла между направлением ветра и направлением зондирования (см. рисунок 1.4). При зондировании в надир азимутальная анизотропия превращается в поляризационную, в этом случае радиояркостная температура максимальна, когда плоскость поляризации принимаемого излучения параллельна направлению ветра, и минимальна, когда они ортогональны.

Данные эксперименты впервые продемонстрировали важность проведения измерений в полном поляризационном базисе. В результате исследований были обнаружены вариации радиояркостной температуры и сечения обратного рассеяния при выполнении виражей и установлено, что наблюдаемое явление поляризационной анизотропии является поверхностным эффектом и не имеет отношения к вариациям радиоизлучения, обусловленным подсветом солнца и облачности. Важным наблюдением стало то, что в условиях отсутствия ветра и наличия зыби эффект поляризационной анизотропии отсутствует. Этот факт говорит о том, что данный эффект связан с гравитационно-капиллярными ветровыми волнами. Кроме того было установлено, что величина поляризационной анизотропии увеличивается с увеличением скорости ветра и уменьшается с увеличением длины волны принимаемого излучения. Таким образом,

обнаруженный эффект можно использовать для дистанционного измерения скорости и направления приповерхностного ветра.

В 80-е гг. XX века исследователями из ИКИ были изучены зависимости величины поляризационной анизотропии от скорости ветра. Под этой величиной понимается разность большой и малой осей поляризационного эллипса при зондировании в надир, что равнозначно амплитуде второй гармоники азимутальных вариаций второго и третьего параметров Стокса [Поспелов, 2004]. Для скоростей ветра до 12 м/с построенные зависимости были аппроксимированы степенной функцией с показателем степени 1,5–2.

Кроме измерений азимутальной анизотропии, выполненных в надир, были также проведены исследования и на настильных углах наблюдения [Гречко и др., 1991]. В результате данных исследований было установлено, что, во-первых, величина анизотропии для настильных углов наблюдения больше, чем для надирных, и, во-вторых, яркостная температура меньше при наблюдении в направлении «по» приповерхностному ветру или «против» него, чем в случае «перпендикулярно» направлению ветра. Проведенные модельные расчеты показали хорошее согласие между теоретическими и экспериментальными данными, и что именно гравитационно-капиллярные волны участвуют в формировании анизотропии, как на настильных, так и на надирных углах наблюдения.

В работах [Гречко и др., 1991; Поспелов, 2004; Meissner, Wentz, 2012] азимутальную анизотропию определяют квазигармонической функцией, четной для вертикальной и горизонтальной поляризаций и нечетной для третьего и четвертого параметров Стокса.

$$\Delta T_{\text{Я}}(\varphi) = \begin{cases} a_1 \cdot \cos(\varphi) + a_2 \cdot \cos(2\varphi), & v, h, \\ a_1 \cdot \sin(\varphi) + a_2 \cdot \sin(2\varphi), & S3, S4, \end{cases}$$

где a_1 и a_2 — амплитуды азимутальных вариаций параметров Стокса. Радиояркостный контраст для вертикальной и горизонтальной поляризаций (рисунок 1.11) можно записать в виде:

$$\Delta T_{\text{Я}} = a_0 + a_1 \cdot \cos(\varphi) + a_2 \cdot \cos(2\varphi),$$

где a_0 — постоянный уровень; $2a_1$ — разность радиояркостной температуры в направлении «по» ветру и «против» него; $2a_2$ — коэффициент анизотропии.

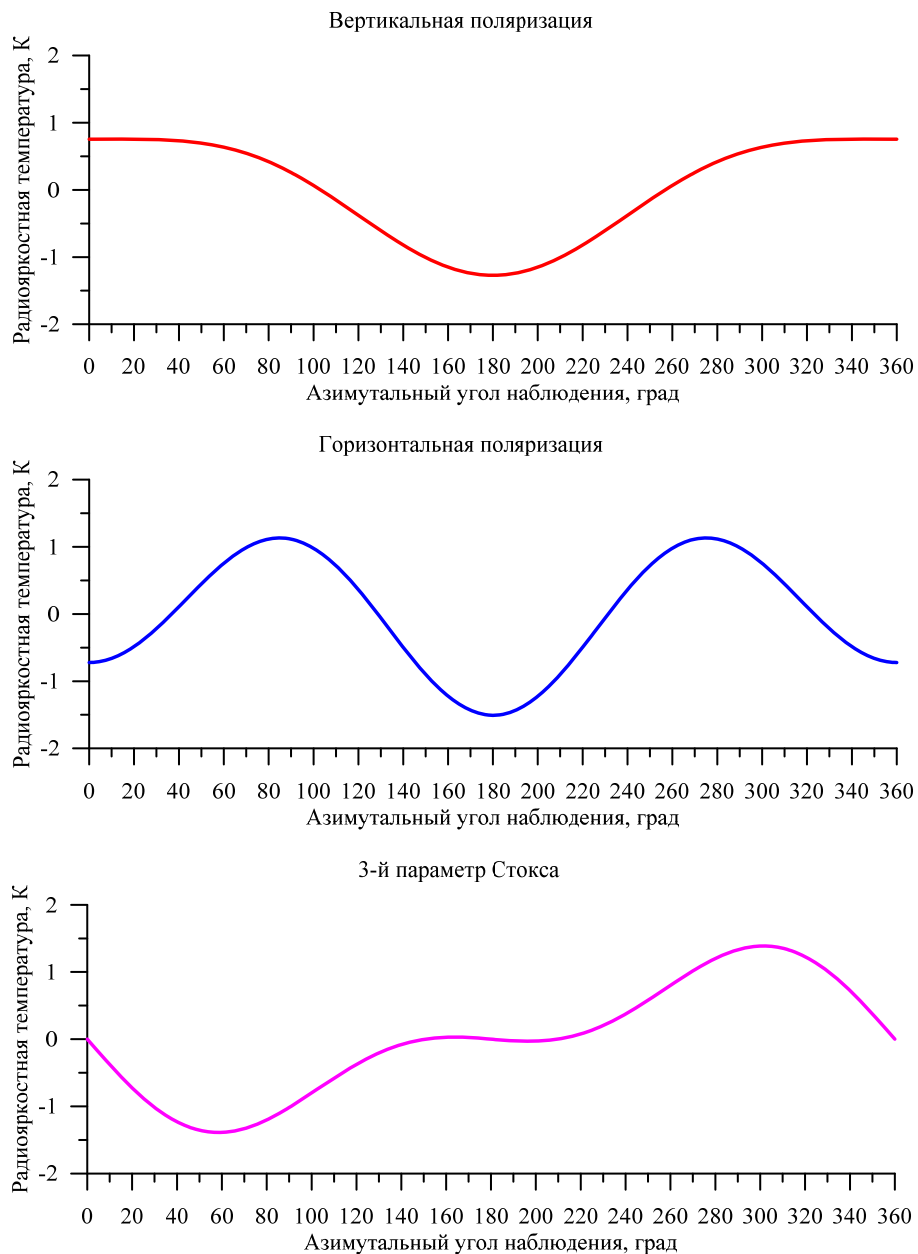


Рисунок 1.11 — Азимутальные вариации собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности. Вертикальный угол наблюдения 52° . Скорость ветра 10 м/с

Исследования азимутальной анизотропии от частоты, угла зондирования и скорости приводного ветра проводились различными научными группами в ряде натуральных экспериментов выполненных с самолетов, дирижабля и спутников. Исследования в ИКИ проводились с самолета-лаборатории Ан-12 [Ирисов и др., 1990; Irisov et al., 1991], в ETL-NOAA¹ — с дирижабля в эксперименте COPE² [Trokhimovski et al., 2000], в JPL-NASA³ — с самолетов-лабораторий DC-8 и P-3 [Germain et al., 2002; Yueh et al., 1999]. Анализ спутниковых измерений анизотропии

¹Environmental Technology Laboratory National Oceanic & Atmospheric Administration (ETL-NOAA).

²Coastal Ocean Probing Experiment (COPE).

³Jet Propulsion Laboratory National Aeronautics and Space Administration (JPL-NASA).

представлен в работах [Meissner, Wentz, 2012; Shannon et al., 2006; Tran et al., 2002]. На рисунке 1.12 и 1.13 приведены угловые зависимости амплитуд первой и второй азимутальной гармоники модифицированных параметров Стокса на частоте 37 ГГц при скорости ветра 10 м/с.

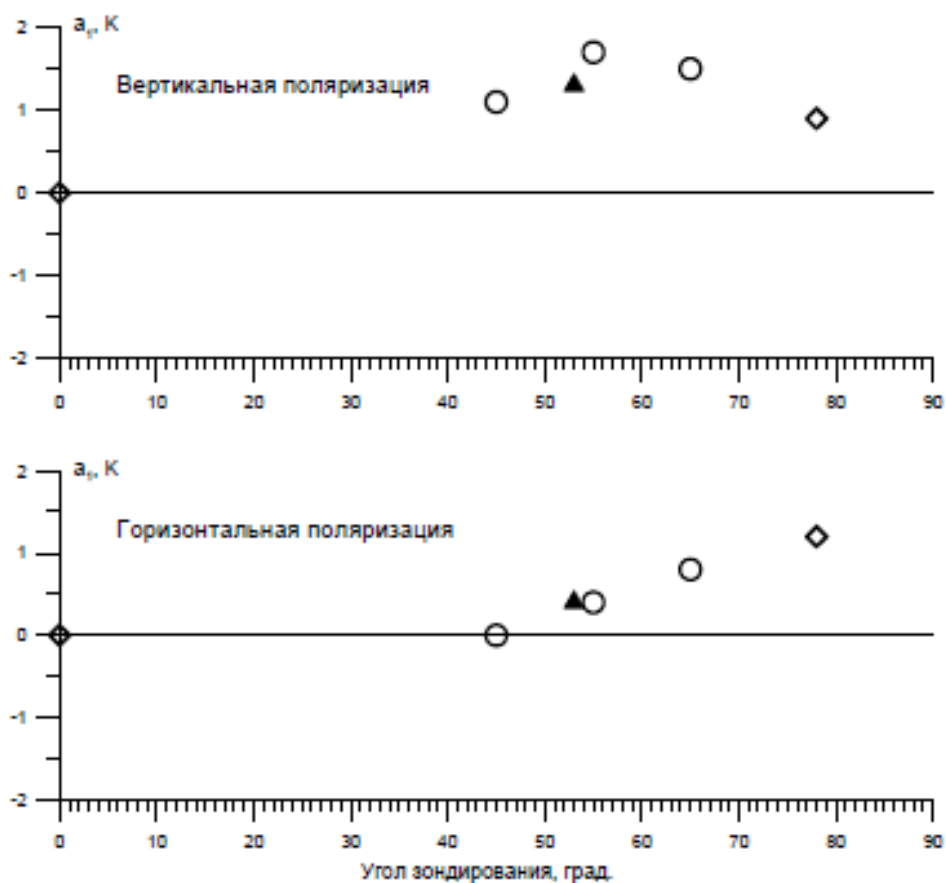


Рисунок 1.12 — Угловая зависимость амплитуды первой гармоники азимутальных вариаций первого и второго модифицированных параметров Стокса на длине волны 8 мм при скорости ветра 10 м/с: \diamond — измерения ИКИ с самолета Ан-12; \circ — измерения JPL с самолетов DC-8 и P-3; \blacktriangle — анализ данных радиометра SSM/I [Поспелов, 2004]

Обнаружение азимутальной изменчивости излучения водной поверхности привело к необходимости разработать его теоретическое описание. Однако работ в данном направлении не много. Так, например, в работе [Tran et al., 2002] выполнен анализ радиометрических измерений со спутника TOPEX / Poseidon microwave radiometer (TMR). Данный прибор выполняет измерения в надир на частотах 18, 21, и 37 ГГц. Измерения прибора TMR были совмещены с измерениями скорости и направления ветра, выполненными скаттерометром SeaWinds (на спутнике QuikSCAT). В результате анализа были получены экспериментальные зависимости приращения эффективного коэффициента излучения ϵ от скорости ветра, усредненного по всем азимутальным направлениям, и зависимости второго гармонического коэффициента a_2 от скорости ветра

(в диапазоне 2–18 м/с). Однако по полученным данным не было построено никаких модельных зависимостей.

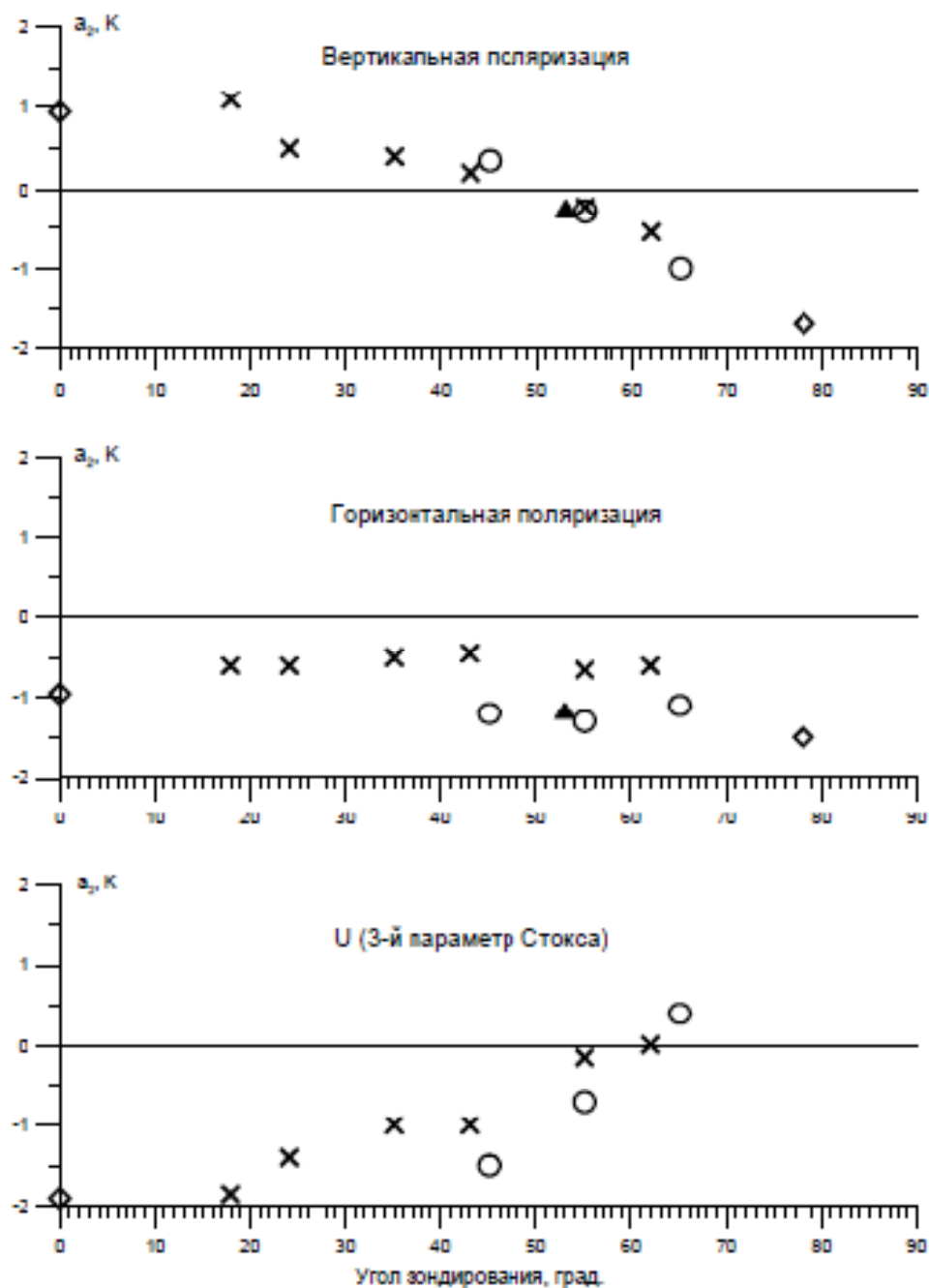


Рисунок 1.13 — Угловая зависимость амплитуды второй гармоники азимутальных вариаций первых трех модифицированных параметров Стокса на длине волны 8 мм при скорости ветра 10 м/с: \diamond — измерения ИКИ с самолета Ан-12; \circ — измерения JPL с самолетов DC-8 и P-3; \times — измерения ETL с дирижабля; \blacktriangle — анализ данных радиометра SSM/I [Поспелов, 2004]

В работе [Shannon et al., 2006] был проведен анализ радиополяриметрических измерений, выполненных прибором WindSat (спутник Coriolis) на частотах 6,8; 10,7; 18,7; 23,8 и 37 ГГц. В данной работе были проанализированы ветровые зависимости гармонических коэффициентов для всех параметров Стокса; построена теоретическо-

эмпирическая модель радиоизлучения взволнованной водной поверхности для угла наблюдения порядка 53° и скоростей ветра до 30 м/с. Также в этой работе была продемонстрирована возможность определения на основе разработанной модели скорости и направления ветра по измерениям прибора WindSat с приемлемой точностью. Однако в работе отсутствуют соотношения для регрессионной части модели азимутальной анизотропии.

В работе [Germain et al., 2002] проведен анализ самолетных измерений излучения взволнованной водной поверхности на частотах 6,8; 10,7; 19,35 и 37 ГГц, выполненных при угле наблюдения 53° . На основе сравнения самолетных измерений и расчетов по двухмасштабной модели волнения, использующей спектр волнения по модели [Durlen, Vesecky, 1985], были подобраны дополнительные коэффициенты. Полученные коэффициенты позволяют в рамках двухмасштабной модели рассчитать азимутальные вариации всех четырех параметров Стокса.

Кроме расчетов по двухмасштабной модели в работе [Germain et al., 2002] приведена упрощенная поляриметрическая модель для расчета азимутальных вариаций эффективных коэффициентов излучения ε и рассеяния r водной поверхности. Гармонические коэффициенты a_1 и a_2 рассчитываются как полином второго порядка, зависящий от скорости ветра. В работе приведены все необходимые для расчета упрощенной модели формулы и коэффициенты, однако, только для вертикального угла 53° .

В работе [Поспелов, 2004] обобщены результаты многолетних исследований микроволнового излучения морской поверхности с помощью самолетных поляриметров. Эти экспериментальные результаты позволили предложить алгоритм восстановления вектора приповерхностного ветра из поляриметрических измерений и наметить основные принципы построения спутниковой аппаратуры для получения глобальной информации о поле ветра над океаном. М.Н. Поспелов [2004] предложил аппроксимировать зависимости величины поляризационной анизотропии $2a_2$ (для измерений в надир) степенной функцией с показателем степени 1,5–2 для частот 15, 20 и 37 ГГц и скоростей ветра до 12 м/с.

Одной из серьезных работ по анализу экспериментальных спутниковых (и не только) данных и разработке полуэмпирической модели радиоизлучения водной поверхности в микроволновом диапазоне является работа [Meissner, Wentz, 2012]. В ней авторы дают подробное описание модели для расчета излучения водной поверхности на частотах от 6 до 90 ГГц при углах наблюдения от 0 до 65° , скоростях ветра от 0 до 20 м/с и широких диапазонов температур поверхности. Данная модель позволяет рассчитывать

азимутальные вариации параметров Стокса в терминах эффективного коэффициента излучения ϵ .

Как показано в данном разделе количество натуральных измерений собственного излучения взволнованной водной поверхности невелико. Однако при таком небольшом количестве собранного материала выявлены как основные закономерности излучения водной поверхности, так и его «тонкие» особенности, такие как азимутальная анизотропия, разная степень чувствительности поляризованного излучения к геометрии поверхности и, следовательно, к скорости ветра. Показана и доказана возможность определения параметров системы океан-атмосфера дистанционными радиометрическими методами, неважно, установлены ли они на платформе, самолете или спутнике. Но так как экспериментальных данных не много, вопрос об установлении взаимно-однозначной связи между измеренными значениями радиояркостных температур и состояний системы океан-атмосфера открыт и требует как дополнительных измерений, так и детального анализа уже имеющихся данных.

1.2. Исследования микроволнового излучения взволнованной водной поверхности из космоса

Вторая половина XX века стала началом космической эры. После удачного запуска 4 октября 1957 г. первого искусственного спутника Земли приборы дистанционного зондирования начали устанавливать на космические аппараты. Важным шагом на данном этапе стала разработка первых радиометрических приборов установленных на спутнике «Космос-243», который был запущен в 1968 г. [Гурвич, Кутуза, 2010]. Эти приборы продемонстрировали возможность получения физической и геофизической информации с орбиты посредством измерения радиотепловых полей. Данный эксперимент был повторен в 1970 г. с использованием спутника «Космос-384».

Важным событием в области спутниковой радиометрии стала разработка радиометра панорамного обзора Electrically Scanning Microwave Radiometer (ESMR), который был запущен на спутнике Nimbus-5. Данный прибор работал только на одной частоте в 19,35 ГГц, измерял осадки и производил картирование ледовой области. Позже в 1978 г. был запущен многочастотный радиометр Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) на спутнике Nimbus-7 с частотами 6,6; 10,7; 18,0; 21,0 и 37 ГГц [Gloersen et al., 1984].

Большой спутниковой программой по пассивному дистанционному зондированию водной поверхности из космоса, длящейся и по сей день, является программа Defense

Meteorological Satellite Program (DMSP) [Hollinger et al., 1990]. В рамках данной программы с 1987 г. была запущена серия радиометров Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I), а с 2003 г. на данных спутниках устанавливаются приборы Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS). Приборы SSM/I и SSMIS имеют одинаковые микроволновые каналы 19,4; 22,2; 37 и 85,5 ГГц для SSM/I и 19,35; 22,2 и 37 ГГц для SSMIS. Угол встречи с землей составляет около 53°. Таким образом, данная линейка приборов предоставляет 30-летний ряд микроволновых измерений поверхности планеты.

Понимание преимущества поляриметрических измерений привело к запуску первого радиополяриметрического прибора WindSat на спутнике Coriolis в 2003 г. [Gaiser et al, 2004]. Данный прибор полностью поляриметрический на частотах 10.7, 18.7 и 37 ГГц. На частотах 6,8 и 23,8 ГГц имеет только вертикальную и горизонтальную поляризации. Углы встречи с землей для разных частот различны, но находятся в диапазоне 50–55°. Большой объем данных, получаемых со спутниковых приборов, позволяет исследовать изменение излучательной способности водной поверхности в широком диапазоне скоростей ветра (рисунок 1.14). Аналогичные зависимости можно построить для всех используемых частот и параметров Стокса.

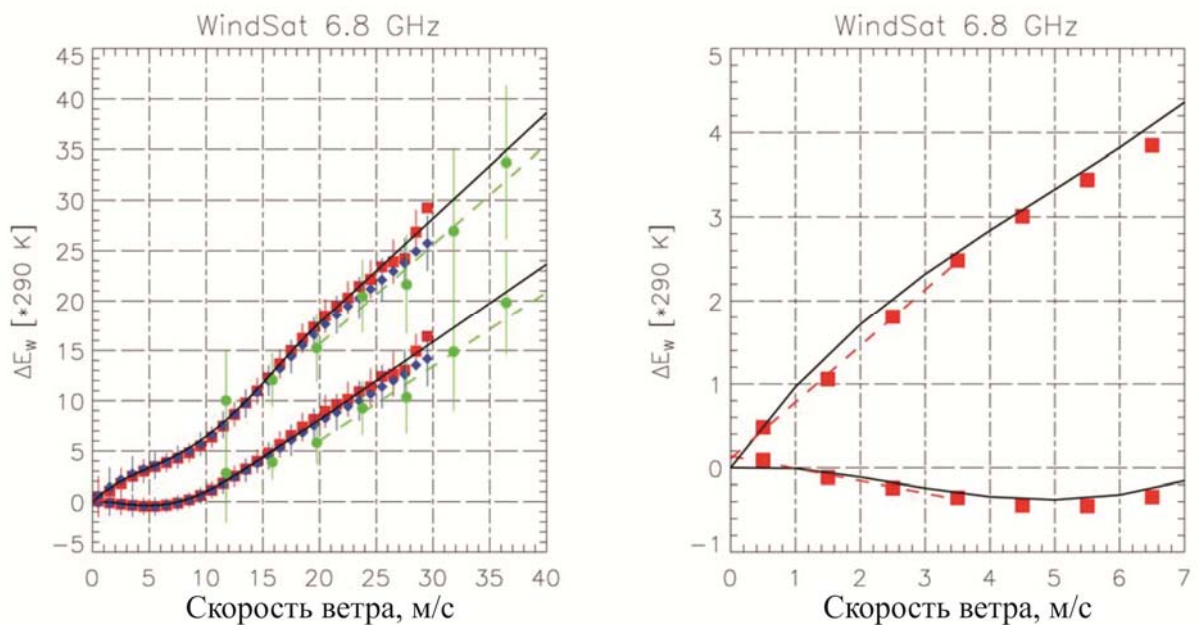


Рисунок 1.14. Приращение излучательной способности водной поверхности, вызванное ветровым воздействием на частоте 6,8 ГГц для вертикальной (нижняя линия) и горизонтальной (верхняя линия) поляризаций по наблюдениям прибора WindSat. Температура поверхности $\sim 20^\circ\text{C}$, угол наблюдения $53,8^\circ$. Линии — модельный расчет; квадраты, ромбы и точки — экспериментальные данные. Излучательная способность была умножена на среднюю температуру поверхности в 290 К. [Meissner, Wentz, 2012]

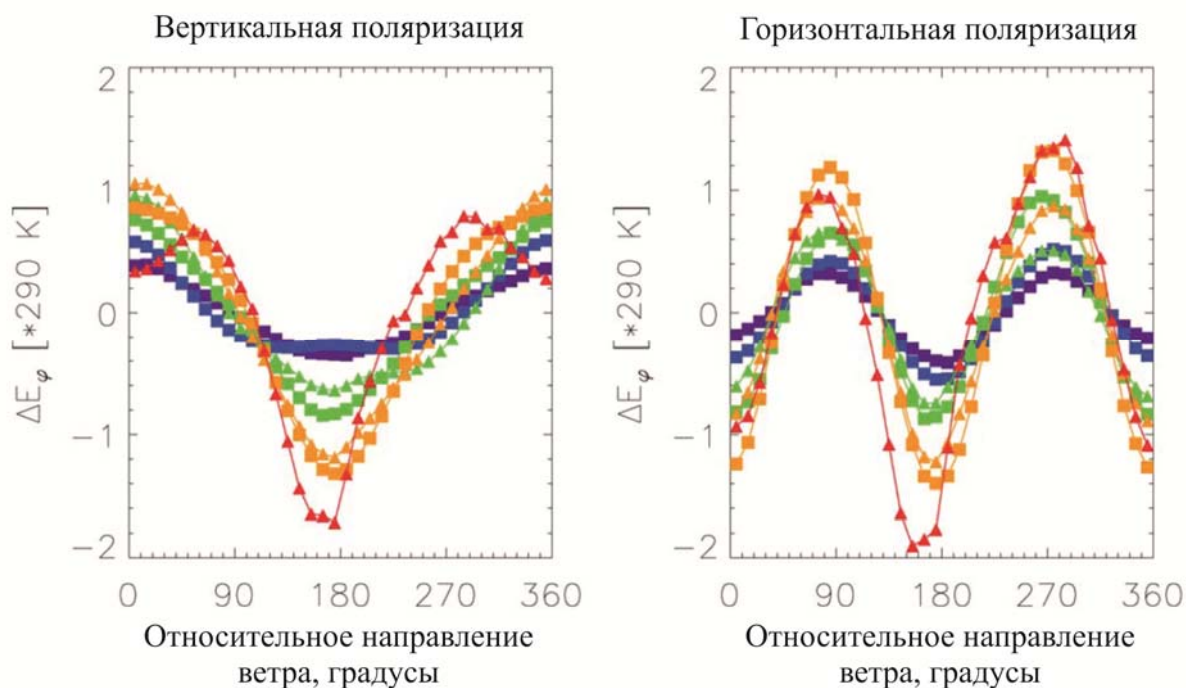


Рисунок 1.15 —Зависимость приращения излучательной способности водной поверхности от относительного направления ветра по данным приборов WindSat и SSM/I для вертикальной и горизонтальной поляризаций. WindSat: 10,7 ГГц — синие квадраты, 18,7 ГГц — зеленые квадраты, 37 ГГц — оранжевые квадраты;SSM/I: 19,3 ГГц — зеленые треугольники, 37 ГГц — оранжевые треугольники, 85,5 ГГц — красные треугольники. Скорость ветра и направление взяты по измерениям прибора QuikSCAT. Излучательная способность была умножена на среднюю температуру поверхности в 290 К [Meissner, Wentz, 2012]

Зависимость излучательной способности водной поверхности от скорости приводного ветра позволяет определять его дистанционно, а от угла между направлением ветра (направлением волнения) и направлением наблюдения (азимутальная зависимость) позволяет восстанавливать направление ветра. Как показано на рисунке 1.15 данная зависимость имеет амплитуду до 3 К при углах зондирования $\sim 53^\circ$. А большой объем наблюдений позволяет установить функциональную зависимость гармонических коэффициентов анизотропии от скорости приводного ветра (рисунок 1.16).

Измерения с борта искусственных спутников Земли стали основным видом данных, используемых в различных областях знания. Однако диапазон вертикальных углов наблюдения, доступных спутниковым приборам, не позволяет в настоящее время исследовать угловую зависимость излучательной способности взволнованной водной поверхности в полной мере. Кроме того еще не решен вопрос, связанный с большим пространственным усреднением полученной информации. Открытыми остаются и другие вопросы, связанные с валидацией полученных данных и возможностью получения информации о поверхности при наличии плотной облачности.

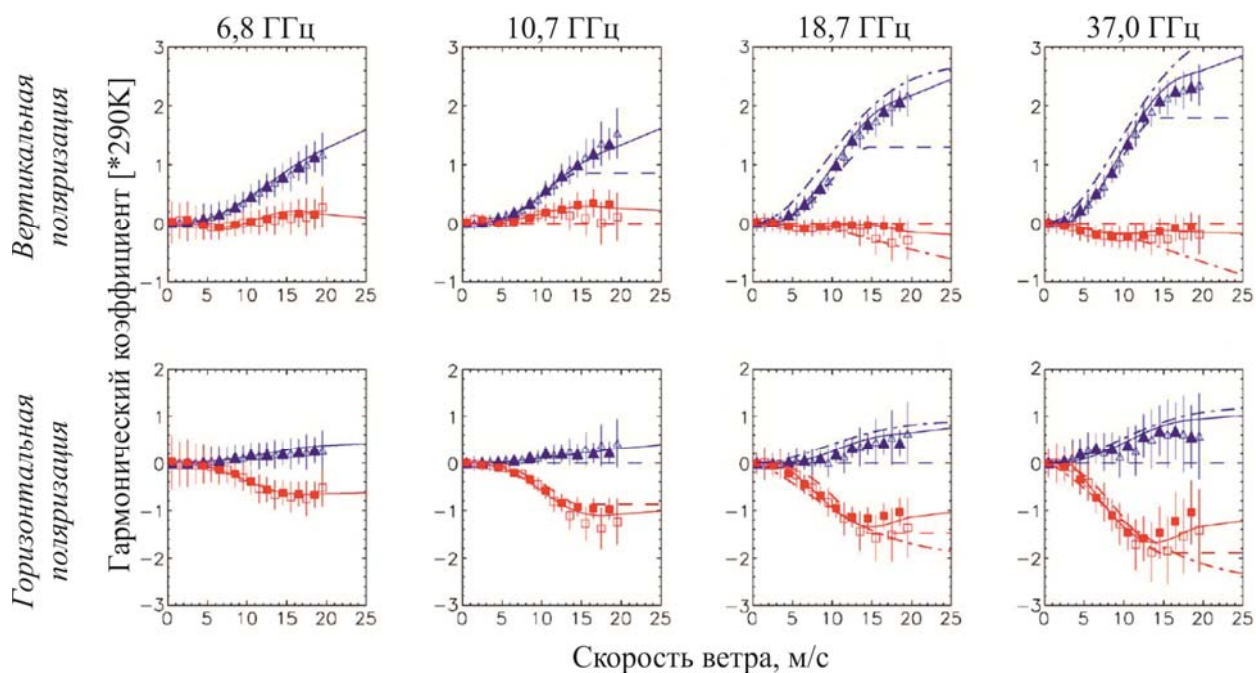


Рисунок 1.16. Первый и второй гармонические коэффициенты для вертикальной и горизонтальной поляризаций, измеренных прибором WindSat. Символы — экспериментальные данные, сплошные линии — модельная функция [Meissner, Wentz, 2012], пунктирная линия — модельная функция из работы [Meissner, Wentz, 2002]

1.3. Радиометрические приборы космического базирования

Глобальные измерения геофизических параметров посредством микроволновых радиометров предоставляют основную информацию для исследователей в различных областях науки. Ежедневные измерения восходящего излучения океана и последующее определение таких основных параметров, как температура поверхности океана, скорость приводного ветра, паросодержание в атмосфере, водозапас облаков, интенсивность осадков и соленость поверхности, используется учеными для изучения и понимания процессов Земной системы.

С момента запуска первого радиометра на спутнике «Космос-243» началась эра дистанционного зондирования Земли из космоса. Список микроволновых радиометров, устанавливаемых на спутниках, приведен в таблице 1.

Таблица 1 — Микроволновые радиометры на искусственных спутниках Земли

Спутник	Прибор	Даты эксплуатации		Частоты приборов, ГГц	Покрытие поверхности
		запуска (начала)	окончания		
«Космос-243»	—	23.09.1968		3,5; 9; 22; 37,5	Глобальное
«Космос-384»	—	10.12.1970		3,5; 9; 22; 37,5	Глобальное
Nimbus-5	ESMR	11.12.1972	05.1977	19,4	Глобальное

Спутник	Прибор	Даты эксплуатации		Частоты приборов, ГГц	Покрывтие поверхности
		запуска (начала)	окончания		
Nimbus-7	SMMR	24.10.1978	20.08.1987	6,6; 10,7; 18; 21; 37	Глобальное
SEASAT	SMMR	28.06.1978	10.10.1978	6,6; 10,7; 18; 21; 37	Глобальное
DMSP F08	SSM/I	20.06.1987	12.1991	19,4; 22; 37; 85,5	Глобальное
DMSP F10	SSM/I	01.12.1990	11.1997	19,4; 22; 37; 85,5	Глобальное
DMSP F11	SSM/I	28.11.1991	05.2000	19,4; 22; 37; 85,5	Глобальное
DMSP F13	SSM/I	24.05.1995	11.2009	19,4; 22; 37; 85,5	Глобальное
DMSP F14	SSM/I	04.04.1997	08.2008	19,4; 22; 37; 85,5	Глобальное
DMSP F15	SSM/I	12.12.1999	Работает	19,4; 22; 37; 85,5	Глобальное
TRMM	TMI	07.12.1997	06.04.2015	10,7; 19,4; 21,3; 37; 85,5	40 ю.ш. – 40 с.ш.
Метеор-3М	MTB3A	10.12.2001	05.04.2006	18;7; 22;238; 33; 36;5 42; 48; 52–57; 91;65; 183;31	Глобальное
ADEOS-II	AMSR	14.12.2002	25.10.2003	6,9; 10,7; 18,7; 23,8; 36,5; 89	Глобальное
AQUA	AMSR-E	04.05.2002	04.10.2011	6,9; 10,7; 18,7; 23,8; 36,5; 89	Глобальное
Coriolis	WindSat	06.02.2003	Работает	6,9; 10,7; 18,7; 23,8; 37	Глобальное
DMSP F16	SSMI/S	18.10.2003	Работает	19,4; 22,235; 37; 91,65	Глобальное
Сич-1М	MTB3A-OK	24.12.2004	15.04.2006	6;9; 10;6; 18;7; 23;8; 31;5; 36;7; 42; 48; 52-57; 91;65; 183;31	Глобальное
DMSP F17	SSMI/S	04.11.2006	Работает	19,4; 22,235; 37; 91,65	Глобальное
SMOS	MIRAS	11.2009	Работает	1,4	Глобальное
«Метеор-М» № 1	MTB3A-ГЯ	17.09.2009	23.09.2014	10;65; 18;7; 23;8; 31;5; 36;5; 42; 48; 52–57; 91;65; 183;31	Глобальное
DMSP F18	SSMI/S	18.10.2009	Работает	19,4; 22,235; 37; 91,65	Глобальное
SAC-D	Aquarius	10.06.2010	07.06.2015	1,4	Глобальное
Suomi NPP	ATMS	28.10.2011	Работает	22 канала от 23 до 183 ГГц	Глобальное
GCOM-W	AMSR2	18.05.2012	Работает	6,9; 7,3; 10,7; 18,7; 23,8; 36,5; 89	Глобальное
GPM	GMI	27.02.2014	Работает	10,7; 18,7; 23,8; 36,5; 89	65 ю.ш. – 65 с.ш.
DMSP F19	SSMI/S	03.04.2014	02.2016	19,4; 22,235; 37; 91,65	Глобальное

Спутник	Прибор	Даты эксплуатации		Частоты приборов, ГГц	Покрытие поверхности
		запуска (начала)	окончания		
«Метеор-М» № 2	МТВЗА-ГЯ	08.07.2014	08.2017	10;65; 18;7; 23;8; 31;5; 36;5; 42; 48; 52-57; 91;65; 183;31	Глобальное
SMAP	–	04.2015	Работает	1,41	Глобальное

КА «Космос-243 и -384» впервые позволили получить глобальные данные о распределении влагосодержания атмосферы, воззапаса облаков, границ ледовых полей, температуры акваторий и материков и другие параметры Земных систем [Башаринов и др., 1974].

СВЧ-радиометр МТВЗА-ГЯ является модификацией приборов МТВЗА и МТВЗА-ОК. По характеристикам МТВЗА-ГЯ не уступает современным зарубежным аналогам. Данный прибор обеспечивает зондирование, как в окнах прозрачности атмосферы, так и в линиях поглощения атмосферы. Это, в свою очередь, позволяет проводить температурно-влажностное профилирование атмосферы и восстанавливать ее интегральные параметры, а также характеристики поверхности [Барсуков и др., 2011].

ESMR (Electrically Scanning Microwave Radiometer) был предназначен для измерения температуры поверхности, работал на одной частоте в 19,4 ГГц с горизонтальной поляризацией. Данные этого прибора использовались для картирования ледовой области и расчета концентрации морского льда.

SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) — сканирующий, пятичастотный микроволновый радиометр, измеряющий восходящее излучение системы поверхность-атмосфера на двух поляризациях (вертикальная и горизонтальная). Прибор был установлен на двух спутниках — Seasat и Nimbus-7. Основным назначением прибора было получение информации о ледовой области для задачи климатических исследований Арктики и Антарктики.

SSM/I (Special Sensor Microwave/ Imager) создан на основе прибора SMMR и устанавливался на метеорологических спутниках программы DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) с 1987 по 1999 г. Данный прибор измеряет яркостную температуру поверхности и атмосферы на четырех частотах и двух поляризациях (кроме частоты 22 ГГц). Использование конического сканирования при неизменном вертикальном угле наблюдения дало большой охват по площади и стало стандартом для радиометров космического базирования, таких как TRMM Microwave Imager, AMSR, SSMIS и др. Получаемые яркостные температуры позволяют восстанавливать четыре

важных метеорологических параметра системы океан-атмосфера: скорость приводного ветра, интегральное паросодержание, водозапас облаков и интенсивность осадков.

SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/ Sounder) — новый прибор дистанционного зондирования Земли в микроволновом диапазоне. Он объединяет возможности сразу трех предшественников: прибора SSM/T-1 Temperature Sounder, SSMI/T-2 Moisture Sounder и SSM/I [Kunkee et al., 2008].

Один из приборов спутника TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) — TMI (TRMM Microwave Imager). Это многоканальный двухполяризационный радиометр с коническим сканированием, разработанный, в основном, для измерения интенсивности осадков в экваториальной зоне. Отличительной особенностью прибора TMI является лучшее пространственное разрешение, по сравнению с SSM/I, связанное с низкой полуэкваториальной орбитой спутника. Из-за своей орбиты измерения доступны только в экваториальной и тропических областях с 40° ю.ш. до 40° с.ш. В дополнение к основному назначению по измерению осадков прибор измеряет приводную скорость ветра, паросодержание, водозапас облаков, а так же является первым спутниковым прибором, способным измерять температуру поверхности океана, информация о которой является крайне важной во многих научных исследованиях.

Основным назначением радиометров серии AMSR (AMSR2, AMSR-E) является сбор данных микроволновых измерений о поверхности земли и океана, а также атмосферы с целью исследования глобальной циркуляции воды и энергии. Данные, получаемые с этих приборов, также используются аналогично с данными SMMR, SSM/I.

WindSat — первый полностью поляриметрический спутниковый радиометр. Он был разработан с целью продемонстрировать возможности поляриметрических измерений системы поверхность-атмосфера. Использование шести поляризаций (вертикальная, горизонтальная, +45, -45, левая и правая) позволяют измерять из космоса не только скорость, но и направление ветра. В дополнение к измерению вектора ветра данный прибор может определять температуру поверхности океана, влажность почвы, характеристики снежного и ледяного покрова и другие геофизические характеристики [Gaiser et al, 2004].

Микроволновый радиометр с синтезированной апертурой MIRAS (Microwave Imaging Radiometer by Aperture Synthesis) проекта SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity mission) предназначен для измерения солености поверхности океана и влажности почвы [Font et al., 2010].

Aquarius — микроволновый радиометр на спутнике SAC-D предназначен для измерения солености морской поверхности посредством определения изменений в

микроволновом излучении поверхности. Основной задачей проекта является изучение влияния солености на погоду и климат в целом, а также создание глобальной карты распределения солености в мировом океана [LeVine et al., 2010].

ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder), микроволновый радиометр с 22 каналами, выполняет сканирование со спутника поперек направления полета (cross-track scanner), что позволяет получать информацию о температуре системы поверхность-атмосфера на разных вертикальных углах наблюдения (в отличие от приборов SSM/I, SMISS, AMSR и WindSat). Прибор разработан для определения температурных профилей атмосферы с целью прогнозирования погоды и долгосрочных климатологических исследований.

Миссия GPM (Global Precipitation Measurement) направлена на измерения осадков как основного компонента переноса воды и энергии в Земной системе. Кроме того, данный проект позволяет в режиме реального времени отслеживать метеорологические явления, наблюдать за водными ресурсами и многое другое. Радиометр GMI (GPM Microwave Imager) используется для соединения информации, получаемой с других микроволновых приборов [Draper et al., 2015].

Конечно, данный список спутниковых радиометров и набор решаемых с их помощью задач не полон, но достаточен для понимания основных целей и задач дистанционного зондирования из космоса системы океан-атмосфера.

1.4. Космический эксперимент «Конвергенция»

В настоящее время (январь 2018 г.) в отделе «Исследование Земли из космоса» Института космических исследований РАН проводится этап эскизного проекта КЭ «Конвергенция», который планируется провести на российском сегменте международной космической станции (РС МКС). 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 [Шарков, 2017].

Одной из задач КЭ «Конвергенция», планируемого на РС МКС, является измерение 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 соответствующие 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 [Садовский, Сазонов, 2017].

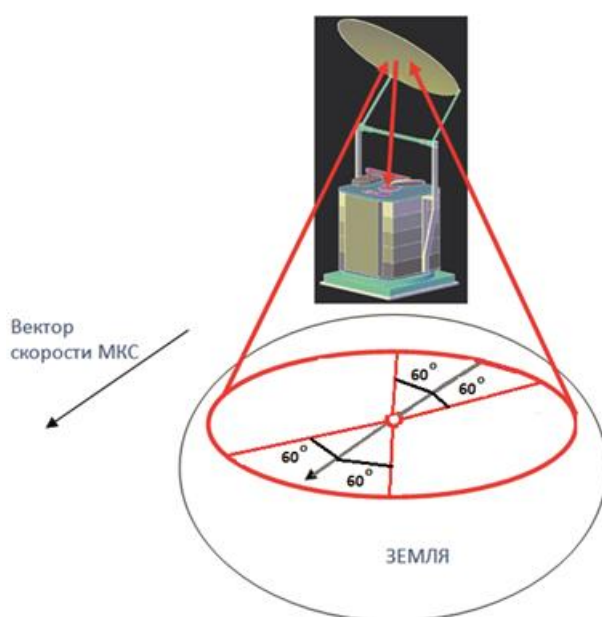


Рисунок 1.17 — Полоса обзора МИРС

Для проведения КЭ «Конвергенция» разрабатывается сканирующий микроволновый радиометр-спектрометр (МИРС). В настоящее время проходит этап эскизного проекта разработки научной аппаратуры. Спектрометр МИРС предназначен для измерения радиотеплового излучения атмосферы Земли и её поверхности в микроволновом диапазоне и представляет собой многоканальный радиометр панорамного типа обзора со сканированием пространства лучами, вращающимися вокруг направления в нади́р под постоянным углом $48,7\text{--}49,8^\circ$ (коническое сканирование) с периодом 1,3 с (рисунок 1.17). При таком способе обзора поверхности Земли для высоты орбиты космического аппарата 410 км полоса обзора составит 830 км с разрешением по поверхности 10 км для высокочастотных каналов [Кузьмин и др., 2017].

Размер зеркала антенны составляет 700 мм. При таком размере антенны для самого низкочастотного канала 10,65 ГГц разрешение составит порядка 50 км, для каналов 18,7 ГГц — 28 км, 23,8 — 27 ГГц — порядка 20 км, а для канала 36,5 ГГц — 15 км. Для всех других каналов 55; 85; 166,3 и 183,3 ГГц разрешение составит 10 км.

Особенностью эксперимента является использование поляриметрических измерений для получения скорости и направления приповерхностного ветра. На трех частотных каналах: 10,65; 18,7 и 36,5 ГГц измеряются три параметра Стокса собственного электромагнитного излучения морской поверхности в двух полосах обзора.

1.5. Радиометрия в других задачах

Дистанционное зондирование Земли имеет очень широкий круг применения и в первую очередь это военная разведка. В научной сфере большинство приложений относятся именно к исследованию окружающей среды. Для атмосферы это температура, осадки, распределение и тип облаков, скорость ветра, концентрации газов, в частности водяных паров, углекислого газа, озона и т.д. На земной поверхности измеряют тектонические движения, топографию, температуру, альбедо, влажность почвы, а также определяют природу поверхностного покрытия в деталях, например, характеризуя тип растительности и ее состояние или составляя карту антропогенной деятельности (дороги, города, загрязнения). Над океаном определяют температуру, скорость ветра, спектр энергии волн, цвет водной поверхности (который связан с биологической производительностью планктона). Изучают также криосферу, в которой исследуют данные о распределении, состоянии и динамических подвижках снега, морского льда, айсбергов, ледников и ледяных полей.

Одной из задач, решаемой с помощью радиометрических приборов дистанционного зондирования, является исследование параметров морского волнения. Исследование поверхностных волн представляет интерес не только с точки зрения процесса их формирования (механика волнообразования), но и как они влияют на другие физические процессы. К таким процессам можно отнести: ветровые течения над поверхностью, формирование верхнего квазигомогенного слоя, процессы изменения климата, передача энергии между атмосферой и океаном и т.д. Так же очень важными являются и прикладные задачи, например: краткосрочное и долгосрочное прогнозирование погоды, предупреждение стихийных бедствий, контроль экологического состояния акваторий, задачи, связанные с судоходством, и многие другие.

Важной задачей является исследование глобальных явлений взаимодействия океана и атмосферы. Основным (и скорее всего единственным) средством получения мгновенных параметров этого взаимодействия в глобальном масштабе является спутниковая микроволновая радиометрия. Это связано с тем, что спутниковые радиометры получают информацию независимо от времени суток, освещенности, облачности (за исключением плотной) и способны работать непрерывно на протяжении нескольких лет. Благодаря этим возможностям уже накоплены временные ряды длительностью в несколько лет (например, для микроволновых приборов SSM/I и SMISS есть данные глобальных измерений полей температуры за период более 15 лет).

Кроме задач, связанных с глобальными наблюдениями за климатом, выделяют исследование полярных регионов (Арктики и Антарктики). Например, выделяют задачу исследования термомассообмена ледового покрытия полярных регионов с атмосферой. Применяя многолетние ряды спутниковых данных в работе [Раев и др., 2015], выполнено детальное исследование стохастических режимов временной эволюции арктического ледового покрова за 1987–2014 гг.

Посредством радиометрических измерений атмосферы определяют не только ее интегральные характеристики, такие как интегральное содержание водяного пара и влагозапас облачности, но и температурно-влажностные профили и изучают их динамику. Измеренное температурно-влажностное поле является основой диагноза текущего состояния атмосферы и базовой характеристикой для краткосрочных и долгосрочных прогнозов. На основе этих данных определяют условия, при которых происходит развитие опасных метеорологических явлений: тропических циклонов, гроз, смерчей.

Задачи, решаемые посредством радиометрических измерений, описанные выше, относятся к наиболее важным. Конечно, список решаемых задач не полон, но и сказанного достаточно для понимания актуальности дистанционных исследований глобальных и локальных процессов на Земле с использованием радиометрических методов, этого мощного и современного инструмента научного познания.

1.6. Выводы по главе 1

Представленный 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, позволил сделать следующие выводы:

- 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 коррелировано 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.
- Радиотепловое излучение гладкой водной поверхности — изотропно, а при появлении ветра над поверхностью становится анизотропным. Данный эффект получил название «азимутальная анизотропия», его величина зависит как от скорости ветра, так и от угла между направлением ветра (направлением волнения) и направлением зондирования. Были проведены лабораторные и натурные эксперименты по изучению данного эффекта, построены некоторые модели [Germain et al., 2002; Meissner, Wentz, 2012; Wentz, 1992] и запущен радиометр WindSat, который использует эффект азимутальной анизотропии для определения направления приводного ветра.
- Экспериментальные исследования радиотеплового излучения, хотя и проводятся в полном диапазоне вертикальных углов наблюдения (от надира до настильных углов), однако подавляющая часть наблюдений сосредоточена вблизи углов 45–55 и 65°. Такой интерес вызван особенностями изменения радиоизлучения вследствие ветрового воздействия на поверхность.
- Для определения параметров системы океан-атмосфера посредством радиометрических измерений решают обратную задачу. Она состоит в том, что на основе измеренных радиотепловых полей системы океан-атмосфера восстанавливаются возможные геофизические параметры этой системы. Для решения обратной задачи применяются различные модельные взаимосвязи геофизических параметров с измеренной радиояркостной температурой. Ранее было отмечено, что модели адекватно описывают излучение только вблизи некоторых углов наблюдения, а не во всем их диапазоне. Поэтому для улучшения моделей необходимо проводить исследования радиоизлучения системы океан-атмосфера в широком диапазоне углов наблюдения.

- Целесообразно исследовать и использовать в модельных расчетах крутизну радиационно-ветровой зависимости, которая определяется по регрессии радиояркостной температуры и скорости приповерхностного ветра без проведения абсолютных измерений и без использования каких-либо моделей. Кроме того, она позволяет отслеживать изменения в радиотепловом излучении, связанные исключительно с состоянием водной поверхности.
- Дистанционные радиополяриметрические наблюдения из космоса дают уникальную возможность проводить глобальный мониторинг водной поверхности и восстанавливать поле приводного ветра. Однако диапазон используемых вертикальных углов наблюдения, доступных спутниковым приборам, не позволяет в настоящее время исследовать угловую зависимость излучательной способности взволнованной водной поверхности в полной мере.

Все перечисленные факты формируют основные задачи диссертационной работы, представленные во введении.

ГЛАВА 2. Исследование радиационно-ветровой зависимости собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности

2.1. Обзор натурального эксперимента

2.1.1. Экспериментальные исследования на океанографической платформе

Океанографическая платформа «Кацивели», расположенная на южной оконечности полуострова Крым близ пос. Кацивели (рисунок 2.1), принадлежит федеральному государственному бюджетному учреждению науки «Черноморскому гидрофизическому полигону РАН» (ЧГП РАН), бывшее ЭО МГИ НАНУ (экспериментальное отделение Морского гидрофизического института Национальной академии наук Украины). Данная платформа удалена от берега на 600 м и находится на свале глубины. Географические координаты платформы составляют $44^{\circ}23'35''$ с.ш. и $33^{\circ}59'04''$ в.д., глубина моря в этом месте составляет ~30 м.

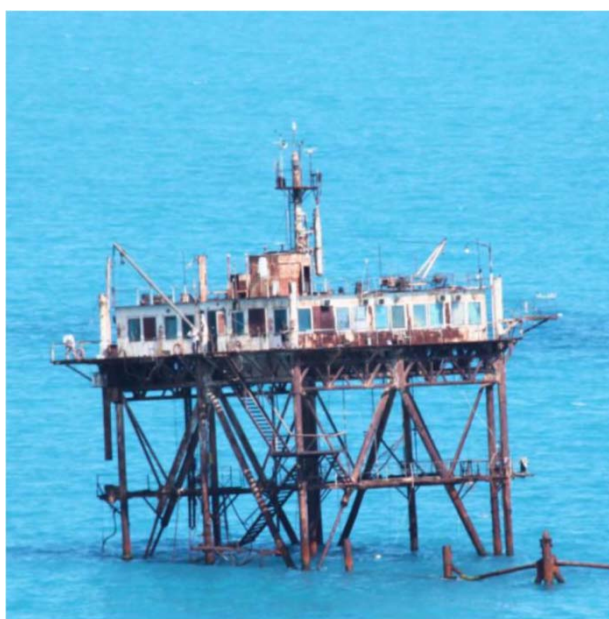


Рисунок 2.1 — Океанографическая платформа. Вид с берега

Энергоснабжение платформы осуществляется по силовому кабелю, проложенному по дну с берега. Персонал платформы и исследовательские команды с оборудованием доставляются на платформу катером. Платформа имеет три рабочие палубы размером 25×25 м: основная на высоте 12 м над уровнем моря, на ней размещаются лаборатории, кают-компания и жилые каюты; нижняя палуба на высоте 4 м над уровнем моря; крыша лаборатории на высоте 15 м; и верхняя палуба (метеомачта) на высоте ~21 м. По своим

возможностям проведения комплексных долговременных измерений платформа не имеет аналогов на территории бывшего СССР, да и во всем мире число таких научно-исследовательских сооружений невелико [Кузьмин и др., 2009].

На данной платформе в период с 2005 по 2016 г. была проведена серия натуральных исследований взаимодействия океана и атмосферы. В постановке комплексного эксперимента принимали участие коллективы исследователей из ИКИ РАН, ИРЭ РАН, ИФА РАН и МГИ РАН. Исследования выполнялись в рамках проекта CAPMOS'05 (Combined Active/Passive Microwave Measurements of Wind Waves for Global Ocean Salinity Monitoring) и грантов РФФИ в 2005, 2007, 2009, 2012 и 2016 гг. Основными направлениями экспериментов являются:

- тестирование нового измерительного оборудования;
- апробация оригинальной методики измерения пространственных спектров ветрового волнения, разработанной в ИКИ РАН — метода нелинейной радиотепловой резонансной спектроскопии (НРРС);
- проведение подспутниковых измерений для обоснования возможности исследования явлений, возникающих на границе раздела океан-атмосфера.

Экспериментальные исследования проводились: в 2005 г. — с 1 по 21 июня; в 2007 г. — с 12 по 21 августа; в 2009 г. — с 20 по 27 октября и в 2012 г. — с 5 по 23 июня, и в 2016 г. с 18 сентября по 14 октября.

2.1.2. Используемое научное оборудование

В экспериментах с 2005 по 2016 г. применялось большое количество измерительного оборудования. Поэтому целесообразно, не вдаваясь в подробности каждого отдельного прибора, сгруппировать аппаратуру по измеряемым параметрам. Такая группировка приведена в таблице 2.1.

Микроволновые радиометры

В различные годы проведения измерений состав радиометрических приборов менялся. В таблице 2.2 приведены характеристики радиометрических приборов, которые использовались в экспериментальных исследованиях.

Таблица 2.1 — Измерительное оборудование

Глубина/высота установки прибора	Название прибора	Измеряемые параметры	Использование в экспериментах, год
Глубина 3, 5, 10, 15 и 20 м	МГИ-1308	Измерители течений	2005
От поверхности до дна	STD-зонд МГИ-4102	Измерение профиля температуры и солёности	2005
	Термисторная цепь из датчиков DST-milli и Starmon-mini	Измерение профиля температуры	2016
Глубина 1 м	Термисторный температурный датчик ИКИ	Температура воды	2005–2016
Глубина 0,3 м	STD-микрозонд МГИ	Измерение температуры	2005
Высота 1,5 м	Метеокомплекс МК-15 (ИКИ)	Измерение метеопараметров (скорость/ направление ветра, температура воздуха, давление)	2005–2012
Высота 4 м	Струнный волнограф МГИ	Измерение параметров волнения	2005–2016
	Струнный волнограф ИКИ	Измерение параметров волнения	2005–2012
	Цифровая фотокамера Olympus 8080 WZ	Периодическая фотосъемка состояния поверхности и атмосферы	2005
	Комплекс из радиометров на автоматическом поворотном устройстве	Измерение восходящего излучения водной поверхности	2005–2012
Высота 12 м	Микроволновый скаттерометр Ку-диапазона	Измерение рассеяния водной поверхностью	2005
Высота 13,5 м	Комплекс из радиометров на автоматическом поворотном устройстве	Измерение восходящего излучения водной поверхности	20016
Высота 15 м	Цифровая фотокамера Olympus 8080 WZ	Периодическая фотосъемка состояния поверхности и атмосферы	2005
Высота 21 м	Метеокомплекс МК-15 (ИКИ)	Измерение метеопараметров (скорость/ направление ветра, температура воздуха, давление)	2005–2016

Таблица 2.2 — Характеристики радиометрических приемников

Прибор	Диапазон длин волн	Поляризация	Ширина луча, град	Чувствительность, К	Использование в экспериментах
Р-ИК	8–12 мкм	–	1	0,10	2005–2016
Р03	3 мм	V, H	7	0,15	2005
Р08	8 мм	V, H, $\pm 45^\circ$	9	0,15	2005–2012
Р15	1,5 см	V, H, $\pm 45^\circ$	9	0,15	2005
Р80	8 см	V	15	0,1	2005
Р08П	8 мм	V, H, $\pm 45^\circ$	9	0,1	2012–2016
Р05	5 мм	V	15	0,07	2016
Р03-1	3 мм	V	7	0,15	2016
РСК	1,1–1,7 см	V	5	0,02	2016

Измерения радиояркой температуры посредством приборов Р08 и Р15 производились на вертикальной (V), горизонтальной (H) поляризации, а также регистрировались значения разности линейных поляризаций $+45^\circ$ и -45° [Dzura et al., 1992]. Оба радиометра выполнены по супергетеродинной схеме. Изменение поляризации осуществляется вращателем с использованием эффекта Фарадея. На выходе приборов регистрируются значения радиояркой температуры на вертикальной и горизонтальной поляризациях и разность радиоярких температур на поляризациях $+45^\circ$ и -45° . Последняя величина пропорциональна (или равна в зависимости от выбора нормировочного коэффициента) третьему параметру Стокса.

Радиометр R03 был разработан в ИРЭ РАН. Особенностью данного прибора является то, что излучение принимается на повернутой на 45° поляризации, а итоговые значения радиояркой температуры на вертикальной и горизонтальной поляризации получаются путем поворота плоскости поляризации на $+45^\circ$ и -45° относительно исходной. Как известно, радиояркая температура системы океан-атмосфера на данной длине волны имеет сильную зависимость от состояния атмосферы, поэтому измерения, выполненные посредством данного прибора, больше подходят для исследования атмосферы и в меньшей степени для исследования водной поверхности.

Радиометр-поляриметр Р08П представляет собой модуляционный радиометр прямого усиления с возможностью измерения поляризационных характеристик принимаемого излучения [Анискович и др., 2007]. Вращение поляризации принимаемого электромагнитного излучения осуществляется с помощью вращателя плоскости поляризации на эффекте Фарадея. Радиометрические данные оцифровываются четырехканальным АЦП и передаются на компьютер.

СВЧ. Радиометр-спектрометр $R_{СК}$ [Смирнов и др., 2016] построен по схеме приемника полной мощности и имеет высокоточную систему поддержания постоянной температуры ключевых элементов. Измерительные каналы радиометра формируются с использованием супергетеродинного квадратурного преобразования. Верхняя и нижняя боковые полосы преобразуются в полосу промежуточных частот и усиливаются двумя независимыми усилителями. Гетеродин выполнен с использованием синтезатора частоты, управляемого с компьютера, что позволяет программно изменять частоту измерений в пределах рабочего диапазона. Прибор имеет следующие основные характеристики: рабочий диапазон частот от 18,0 до 27,2 ГГц, спектральное разрешение 200 МГц, чувствительность приемника 0,02 К в полосе частот 200 МГц, стабильность поддержания температуры ключевых элементов 0,002 К.

Так как во всех экспериментах радиоизлучение взволнованной водной поверхности измерялось радиометрами с длиной волны 8 мм (частотой ~ 37 ГГц), то с помощью приборов R08 и R08П удалось накопить большой объем экспериментальных данных. Это, в свою очередь, определило выбор данного частотного диапазона для исследования радиационно-ветровой характеристики собственного радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности.

Дополнительно измеряемые параметры

В ходе экспериментов регистрировались показания автономных метеокомплексов МК-15, а именно: скорость ветра U , направление ветра D , атмосферное давление P , относительная влажность H и температура атмосферы T_A . Температура воды T_B и температура радиопоглощающего материала $T_{ЧТ}$ измерялась с помощью термодатчиков. Также производилась периодическая фотосъемка состояния поверхности моря и атмосферы с помощью веб-камеры, установленной на поворотно-сканирующей платформе.

Измерение параметров волнения осуществлялось с помощью волнографов [Сазонов и др., 2014]. Регистрация волнения проводилась одновременно двумя волнографическими решетками. Первая из них была специально разработана в ИКИ РАН и представляла собой пять струнных волнографов, один из них был помещен в вершину воображаемого прямого угла, а по два датчика — на стороны угла на расстояниях 5 и 15 см от вершины [Антонов, Садовский, 2007]. Во второй решетке из шести струнных волнографов, традиционно используемой при волнографических исследованиях МГИ [Чечина, 2013; Mironov et al., 2012], датчики были расположены в вершинах и центре правильного

пятиугольника с внешним радиусом 25 см. Запись волнограмм выполнялась с частотой 10 Гц.

2.1.3. Техника выполнения эксперимента

Методика измерений заключалась в циклическом сканировании водной поверхности непрерывно 24 ч в сутки за исключением остановок на техническое обслуживание или ремонт оборудования. В начале и конце каждого цикла сканирования приборы поворачивались в сторону радиопоглощающего материала, используемого в качестве абсолютно черного тела. Калибровка радиометров осуществлялась на основе измерений температур атмосферы и черного тела.

Эксперимент в 2005–2009 гг.

Поворотно-сканирующая платформа «Траверс» (рисунок 2.2), разработанная в ИКИ РАН, размещалась на конце выноса на высоте 4 м над уровнем моря с южной стороны платформы. Такое положение позволило охватить сектор водной поверхности практически в 180° (от 73° до 251°) (рисунок 2.3).



Рисунок 2.2 — Поворотно-сканирующая платформа «Траверс»

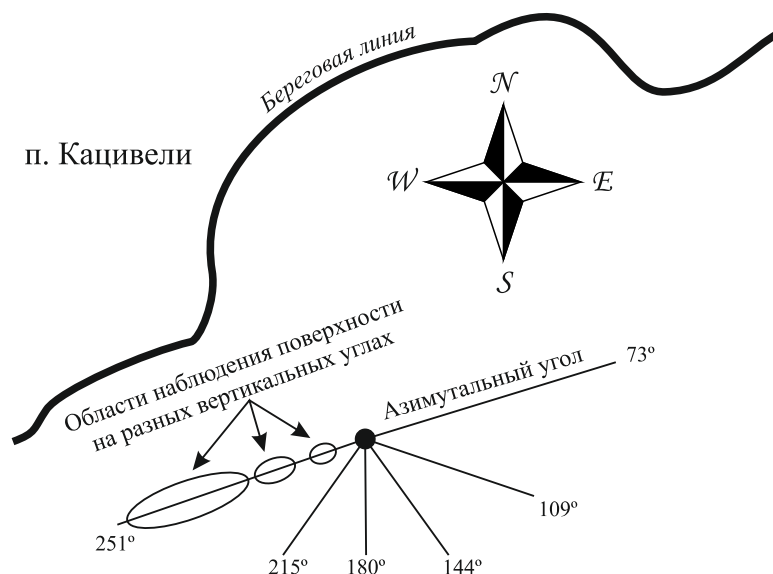


Рисунок 2.3 — Схема сканирования водной поверхности в экспериментах 2005–2009 гг.

Сканирование осуществлялось в вертикальном направлении (вверх/вниз) от 20 до 151°, отсчитанных от надира на шести азимутальных углах, равноотстоящих друг от друга на 36°. По завершению сканирования приборы устанавливались на угол места порядка 65–70°, и платформа выполняла азимутальный скан, переходя в начальную точку. Управление поворотно-сканирующей платформой и регистрация данных проводилась с помощью персональных компьютеров. Скорость сканирования по вертикали и горизонтали составляет ~1 град/с (0,17 об/мин). Продолжительность такого цикла составляла порядка 25 мин. Данные, поступающие с радиометрических приборов, оцифровывались с частотой в 3 Гц.

При выполнении вертикального сканирования измерялась радиояркая температура водной поверхности от 20° до горизонта, а затем радиояркая температура атмосферы до угла в 153°. Азимутальный скан, выполняемый в конце сканирования, позволял оценить величину эффекта азимутальной анизотропии радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности.

При сканировании на первом и последнем азимутальном углах, когда антенны микроволновых радиометров направлены вниз, поле их обзора закрывал поглотитель микроволнового излучения (абсолютно черное тело с известным коэффициентом отражения), закрепленный на выносе у основания поворотного устройства. При известной температуре поглотителя $T_{\text{чт}}$ осуществлялась внешняя калибровка радиометров.

Эксперимент в 2012 г.

В эксперименте 2012 г. местоположение поворотной-сканирующей платформы было таким же, как и в предыдущих экспериментах. В течение экспериментального периода проводились испытания разработанного радиометра поляриметра 8 мм диапазона (P08П). Так же была изменена схема сканирования водной поверхности.

Из-за наличия измерительного оборудования других научных групп, расположенного на соседних выносах, было принято решение изменить азимутальные углы, на которых выполнялось вертикальное сканирование. Сама схема осталась аналогична рисунку 2.3, но азимутальные углы имели значения 96, 125, 153, 182, 211 и 239°. Такое изменение сократило сектор обзора до 143°.

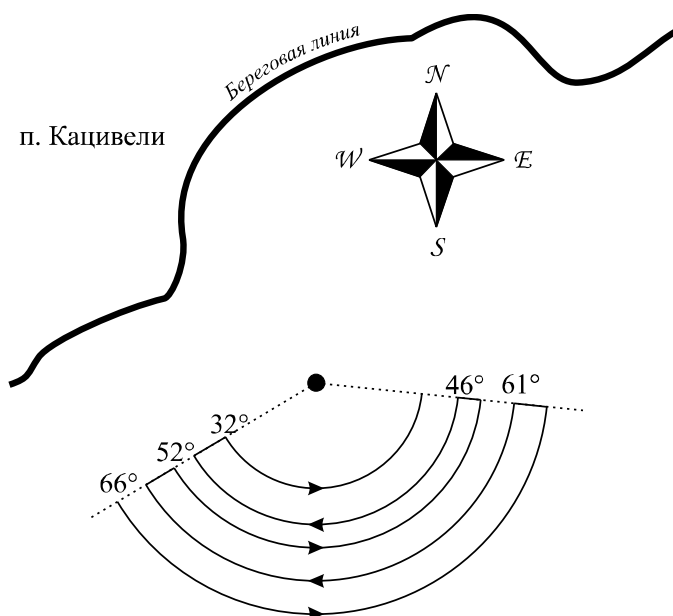


Рисунок 2.4 — Схема сканирования водной поверхности по азимуту

По окончании основного цикла сканирования было введено сканирование по азимуту. На фиксированных вертикальных углах в 32, 46, 52, 61 и 66° выполнялось движение справа налево, потом происходила смена угла, и выполнялось движение слева направо. Схематично сканирование изображено на рисунке 2.4. Такой режим сканирования позволяет исследовать пространственную структуру азимутальной анизотропии.

В эксперименте 2016 г. поворотная установка «Траверс» была заменена новой поворотной платформой «Траверс-2» (рисунок 2.5). Эта новая, современная поворотно-сканирующая установка разрабатывалась в ИКИ РАН в течение последних двух лет.



Рисунок 2.5 — Поворотно-сканирующая платформа «Траверс-2»

Также изменения затронули место установки приборов. В этом эксперименте весь комплекс был размещен на угловом выносе рабочей палубы на высоте 13,5 м над уровнем моря. Увеличение высоты позволило уменьшить пространственное разрешение антенных систем микроволновых радиометров и уменьшить влияние крупномасштабного волнения на результаты измерений.

Возможности новой поворотной платформы позволили увеличить скорость сканирования до 2 град/с (0,33 об/мин), что существенно сократило время сбора информации. Были внесены изменения в схему сканирования. Полный цикл сбора радиометрических данных состоял из трех повторяющихся этапов:

1. *Сканирование по вертикальному углу (Этап 1).*

В начале выполнялась калибровка радиометра Р08П по согласованным нагрузкам с температурами 51 и 13°C (рисунок 2.6). Затем установка поворачивалась по азимуту на фиксированный угол 99° и выполнялось вертикальное сканирование водной поверхности и атмосферы в диапазоне углов от 3 до 180° (вверх и вниз). Далее изменялся азимут на

фиксированное значение в 28° , сканирование производилось вверх, и, дойдя до верхней точки, снова изменялся азимут, и сканирование производилось вниз. Данные действия повторялись вплоть до азимута в 240° . После данного цикла платформа поворачивалась для калибровки радиометра-спектрометра ($R_{СК}$) по радиопоглощающему материалу. Действия на данном этапе аналогичны схеме на рисунке 2.3.



Рисунок 2.6. а) Радиопоглощающий материал для частоты ~ 37 ГГц; б) Расположение согласованных нагрузок в эксперименте (зеленая — 51°C , черная — 13°C).

2. Сканирование по азимутальному углу (Этап 2).

Поворотная платформа устанавливалась на азимут в 99° , и на вертикальном угле в 10° производилось сканирование по азимуту до его значения в 260° . Затем изменялись вертикальные углы, и платформа возвращалась по азимуту на угол в 99° . Азимутальные сканирования выполнялись на углах 10 , 25 , 40 , 55 , 65 и 125° . Сканирование на угле в 125° позволяет оценить горизонтальную неоднородность нисходящего излучения атмосферы. Действия на данном этапе аналогичны схеме на рисунке 2.4.

3. Измерение атмосферы (Этап 3).

В силу того, что в эксперименте использовался многочастотный радиометр $R_{СК}$, разработанный в ИРЭ РАН, одной из задач стало измерение излучения атмосферы в линии поглощения водяного пара. Для этого поворотная платформа устанавливалась на фиксированный азимутальный угол в 108° и в течение 40 с приборы принимали излучение атмосферы на четырех вертикальных углах (180 , 140 , 110 и 94°) и излучение поверхности на угле 55° .

Полный цикл сбора радиометрических данных состоял из приведенных трех этапов, повторяющихся в следующем порядке: *Этап 1 — Этап 2 — Этап 1 — Этап 3*.

2.2. Обработка экспериментальных данных

2.2.1. Внешняя калибровка радиометров

Калибровка радиометра — это действие, которое устанавливает взаимно-однозначную связь между антенной температурой и радиояркостной температурой измеряемого физического объекта. В настоящее время выходные сигналы прибора в ходе экспериментальных исследований регистрируются на персональный компьютер в виде кодов аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Таким образом, внешняя калибровка радиометра устанавливает взаимно-однозначную связь между радиояркостной температурой и напряжением на выходе АЦП (кодами АЦП).

Основным свойством радиометрических приемников, используемых как в космосе, так и на земле, является линейная зависимость между антенной и радиояркостной температурами. Это дает возможность выполнить внешнюю калибровку, используя два разнесенных по температуре источника излучения. В космических приборах этими источниками являются: 1) холодная нагрузка — излучение космоса с известной температурой в 2,73 К и 2) горячая нагрузка — генератор шума с известной физической температурой.

В наземных экспериментах на океанографической платформе использовался аналогичный подход. В качестве горячей нагрузки для радиометров использовался поглотитель, выполненный из синтетических волокон и представляющий собой абсолютно черное тело с известным коэффициентом излучения. В качестве холодной нагрузки использовались угловые значения радиояркостной температуры атмосферы, рассчитываемые по модели однослойной атмосферы.

Описанные действия позволили получить линейную зависимость между выходным сигналом радиометра, представленным в виде кодов АЦП, и радиояркостной температурой $T_{\text{я}}$ измеряемого объекта (водной поверхности и атмосферы). В таблице 2.3 приведены калибровочные коэффициенты для перевода записанных кодов АЦП в радиояркостные температуры для вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризаций по формуле $T_{\text{я}} = a_0 + a_1 \cdot U_{\text{АЦП}}$, где $T_{\text{я}}$ — измеренная радиояркостная температура; $U_{\text{АЦП}}$ — напряжение на выходе АЦП в виде кодов; a_0 и a_1 — калибровочные коэффициенты.

Таблица 2.3 — Калибровочные коэффициенты радиометрических приборов

Радиометрический канал, поляризация		Год измерений	a_0	a_1
P08	H	2005	-404,95	0,00563
	V		463,169	-0,0042
	H	2007	-405,99	0,05597
	V		459,958	-0,0428
	H	2009	-417,23	0,05739
	V		465,226	-0,0436
	H	2012	-406,69	0,05616
	V		464,966	-0,0431
P08П	H	2016	314,57	0,123
	V		314,559	0,1235

Радиояркая температура водной поверхности и атмосферы

Измеренное радиометром собственное радиотепловое излучение взволнованной водной поверхности (в случае наземно-дистанционных наблюдений, когда восходящим излучением атмосферы между объектом и приемной антенной можно пренебречь) может быть записано как $T_{я.эксп} = T_{я.мп} + R \cdot T_{я.атм}$, где $T_{я.эксп}$ — радиояркая температура водной поверхности; R — коэффициент отражения, рассчитываемый по формулам Френеля для термодинамической температуры воды $T_{0.мп}$; $T_{я.атм}$ — радиояркая температура атмосферы. Следует отметить, что все члены этого выражения обладают частотной и поляризационной (за исключением $T_{я.атм}$) зависимостью, а также являются функциями углов наблюдения (вертикального θ и азимутального ϕ) и оно справедливо при описании излучения гладкой водной поверхности $T_{я.гл.мп}$, когда $T_{я.мп} = T_{я.гл.мп} = E \cdot T_{0.мп}$, где E — коэффициент излучения водной поверхности, $E = 1 - R$.

При появлении волнения геометрия поверхности изменяется, тем самым нарушается условие $T_{я.мп} = T_{я.гл.мп}$ и соотношение для радиояркой температуры морской поверхности принимает вид: $T_{я.мп} = T_{я.гл.мп} + \Delta T_{я.мп}$, где добавка $\Delta T_{я.мп}$ называется радиоярким контрастом и учитывает изменение интенсивности излучения, обусловленное трансформацией границы раздела вода-воздух, а также учитывает отражение атмосферы (за исключением зеркального). В большинстве приложений, решаемых методами радиополяриметрии, наибольший интерес связан не с полной величиной радиояркой температуры, измеренной в эксперименте, а только с той ее частью, которая связана с изменением геометрии поверхности, а именно,

радиояркостным контрастом $\Delta T_{\text{я.мп}}$, который определяется на основе эксперимента как $\Delta T_{\text{я.мп}} = T_{\text{я.эксп}} - E \cdot T_{0,\text{мп}} - R \cdot T_{\text{я.атм}}$.

Анализ величины радиояркостного контраста является наиболее распространенным методом исследования параметров волнения, однако, сама величина $\Delta T_{\text{я.мп}}$ обладает следующими недостатками:

- при вычислении $\Delta T_{\text{я.мп}}$ из экспериментальных измерений вычитается расчетная величина радиояркостной температуры гладкой водной поверхности и отраженное зеркально излучение атмосферы. Вычисленная величина $\Delta T_{\text{я.мп}}$ содержит в себе информацию об отражении атмосферы на не зеркальных углах наблюдения. Это связано с наличием отражений от уклонов морской поверхности. Таким образом, при измерении $\Delta T_{\text{я.эксп}}$ в одинаковых метеоусловиях (скорость и направление ветра, температура воды и воздуха), но при разных состояниях атмосферы приводит к сильным вариациям величины $\Delta T_{\text{я.мп}}$. Это, в свою очередь, влияет на интерпретацию результатов измерений;
- если коэффициенты отражения R и излучения E гладкой водной поверхности рассчитываются на основе модели диэлектрической проницаемости, то расчет $\Delta T_{\text{я.гл.мп}}$ содержит в себе ошибку моделирования, которая трансформируется в ошибку вычисления $\Delta T_{\text{я.мп}}$.

Намного реже, чем радиояркостный контраст $\Delta T_{\text{я.мп}}$, используют приращение радиояркостной температуры от приращения скорости ветра $\partial T_{\text{я}} / \partial W$, где ∂W — изменение скорости приводного ветра, которое в данной работе равно 1 м/с. Величина $\partial T_{\text{я}} / \partial W$ является производной радиояркостной температуры по скорости ветра и характеризует чувствительность изменения радиоизлучения от ветрового воздействия на поверхность (также ее называют радиационно-ветровой зависимостью). Эта величина, как и исходная радиояркостная температура, обладает частотной и поляризационной зависимостью, а также является функцией от углов наблюдения.

В случае наземного эксперимента радиационно-ветровая зависимость может быть описана следующим образом: $\frac{\partial T_{\text{я}}}{\partial W} = \frac{T_{\text{я.эксп}}(W + \Delta W) - T_{\text{я.эксп}}(W)}{\Delta W}$. Преобразуем данное

выражение, используя формулу для радиояркостного контраста: $\frac{\partial T_{\text{я}}}{\partial W} = \frac{\Delta T_{\text{я.мп}}(W + \Delta W) + E T_{0,\text{мп}} + R T_{\text{я.атм}} - \Delta T_{\text{я.мп}}(W) - E T_{0,\text{мп}} - R T_{\text{я.атм}}}{\Delta W}$. Сократив

подобные слагаемые, получим: $\frac{\partial T_{\text{я}}}{\partial W} = \frac{\Delta T_{\text{я.мп}}(W + \Delta W) - \Delta T_{\text{я.мп}}(W)}{\Delta W}$.

Из представленной формулы можно сделать следующие выводы:

- при вычислении величины $\partial T_{\text{я}}/\partial W$ из экспериментальных данных, полученных в схожих метеоусловиях (обычно в одном эксперименте с небольшим временным расхождением), компоненты, связанные с излучением гладкой водной поверхности и зеркального отражения атмосферы сокращаются, тем самым автоматически устраняется ошибка моделирования коэффициентов отражения R и излучения E .
- радиояркостный контраст $\Delta T_{\text{я.МП}}$ включает в себя излучение водной поверхности и неучтенный остаток переотражения атмосферы на не зеркальных углах наблюдения, связанные с ветровым воздействием на поверхность. При вычислении величины $\partial T_{\text{я}}/\partial W$ остается приращение излучения водной поверхности и приращение неучтенного остатка переотражения атмосферы, который можно считать малым, и что величина $\partial T_{\text{я}}/\partial W$ связана только с изменением состояния поверхности.

2.2.2. Крутизна радиационно-ветровой зависимости по экспериментальным данным

В целях исследования были выбраны измерения радиотеплового излучения водной поверхности, зафиксированные при стабильном восточном или западном направлении ветра, а также при возрастании скорости приповерхностного ветра. Экспериментальные данные выбирались из условия, когда температура воздуха была больше или равна температуре воды (положительная или нейтральная стратификация) и при чистой или малооблачной атмосфере. В результате было собрано 1502 отдельных записей сканирования (вверх, либо вниз) водной поверхности за 2005 г., 668 сканирований за 2007 г. и 1561 сканирование за 2009 г. Суммарное количество составило 3731 запись. Гистограмма распределения накопленных данных для каждого вертикального угла наблюдения в диапазоне 30–80° от скорости приповерхностного ветра показана на рисунке 2.7.

На основе измеренных в ходе эксперимента значений температуры воды и ее солёности, которая принимается равной 17 ‰ (среднее значение для акватории Черного моря) проводился расчет коэффициентов отражения R и значений $T_{\text{я.МП}}$ путем нахождения разницы измеренной радиояркостной температуры водной поверхности и атмосферы (взятое на зеркальных углах наблюдения) в соответствии с выражением:

$$T_{\text{я.МП}} = T_{\text{я.ЭКСП}} - R \cdot T_{\text{я.АТМ}}.$$

На следующем этапе проводилось усреднение полученных значений $T_{я.мп}$. Для этого были выбраны записи измерений, полученные при схожих метеоусловиях, т.е. при скорости ветра $\pm 0,5$ м/с, температуре воды и воздуха $\pm 0,5$ К. Итоговые значения $\overline{T_{я.мп}}$ с оценкой доверительных интервалов (уровень достоверности 0,95) [Бендат, Пирсол, 1989] рассчитаны по измерениям, соответствующим диапазонам скоростей ветра 1–2, 2–3 м/с и так далее, вплоть до 17–18 м/с.

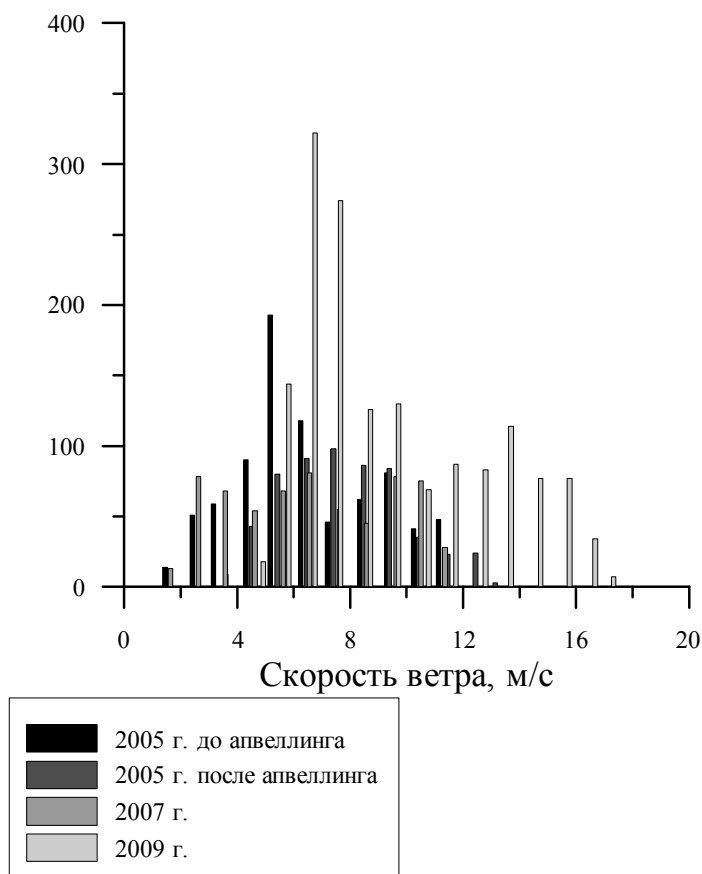


Рисунок 2.7 — Гистограмма распределения количества накопленных данных

*Радиояркостьная температура водной поверхности
в экспериментах 2005–2009 гг.*

На рисунке 2.8 представлены усредненные значения собственного излучения взволнованной водной поверхности на вертикальной и горизонтальной поляризациях, измеренные при различных скоростях приводного ветра. Анализ результатов, полученных в диапазоне вертикальных углов $32-80^\circ$, показал, что измерения, полученные за три экспедиционных периода, хорошо коррелированы между собой. Величина радиояркостьной температуры, измеренной на горизонтальной поляризации, растет линейно с увеличением скорости приповерхностного ветра. Радиояркостьная температура,

измеренная на вертикальной поляризации для углов наблюдения $32\text{--}58^\circ$ ведет себя аналогичным образом. Измеренные в диапазоне углов наблюдения $58\text{--}80^\circ$ значения $T_{\text{Я.ЭКСП}}^V$ уменьшаются с ростом скорости ветра, приобретая все более нелинейный характер для настильных углов наблюдения.

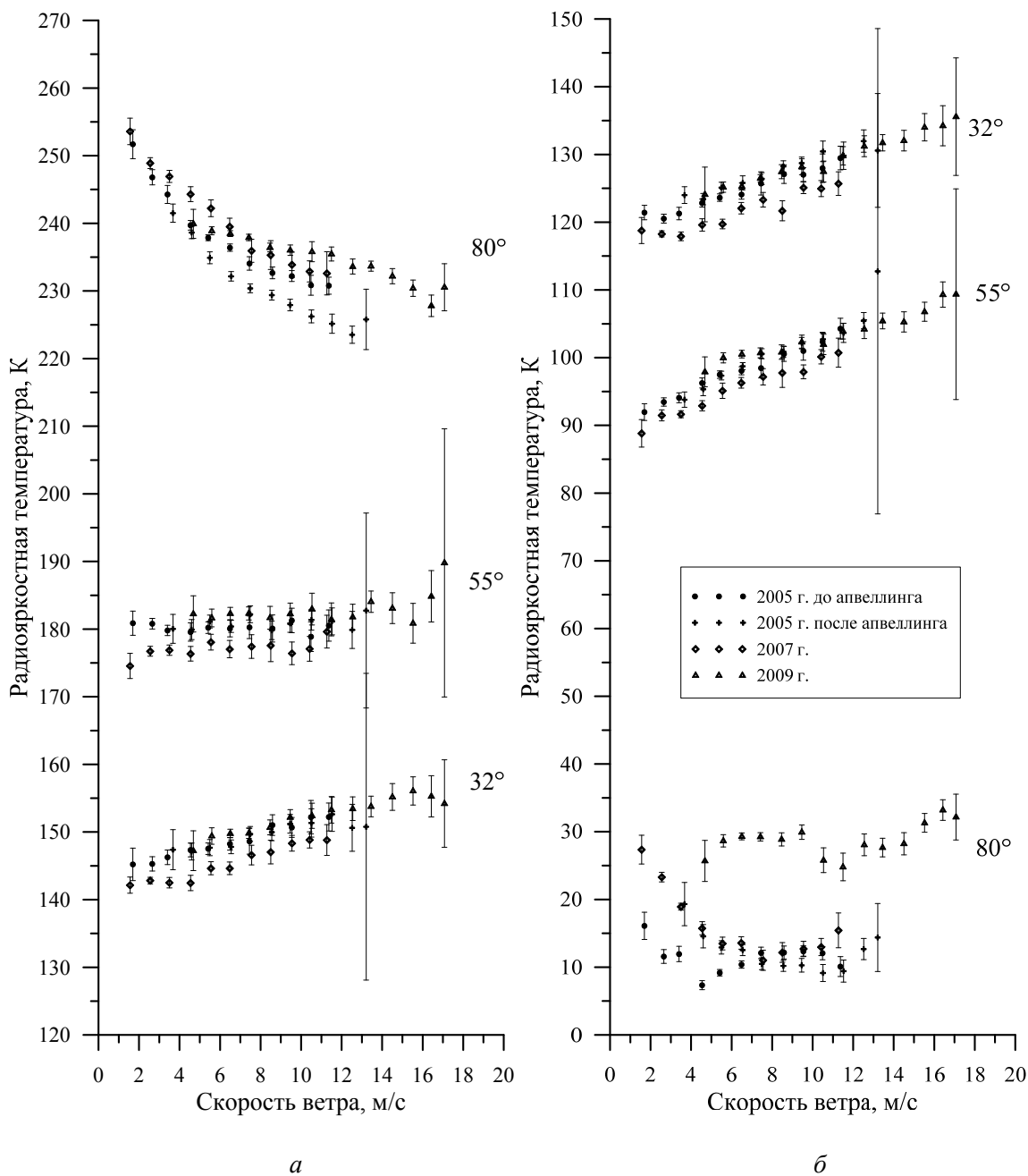


Рисунок 2.8 — Зависимость радиояростной температуры взволнованной водной поверхности от скорости приводного ветра для вертикальной (а) и горизонтальной (б) поляризацій. Экспериментальные данные за 2005–2009 г.

Представленные зависимости наглядно демонстрируют, что радиояростная температура на обеих поляризациях для большинства вертикальных углов наблюдения

зависит от скорости ветра. Исключением является поведение собственного излучения взволнованной водной поверхности от скорости приводного ветра на вертикальной поляризации при углах наблюдения в $50\text{--}55^\circ$. При этом на горизонтальной поляризации, как будет показано далее, при углах наблюдения в $53\text{--}57^\circ$ отмечена наибольшая чувствительность собственного излучения водной поверхности к изменению скорости ветра.

Приращение радиояркой температуры водной поверхности

На рисунке 2.9 представлены угловые зависимости приращения радиояркой температуры взволнованной водной поверхности от приращения скорости приводного ветра ($\partial T_{\text{я}}/\partial W$) на интервале $5\text{--}6\text{ м/с}$ для вертикальной (а) и горизонтальной (б) поляризаций. Представлены экспериментальные данные за 2005 и 2007 гг., в 2009 г. во время выполнения исследований не было зарегистрировано данных при скорости ветра в 5 м/с , таким образом, нет возможности вычислить величину $\partial T_{\text{я}}/\partial W$.

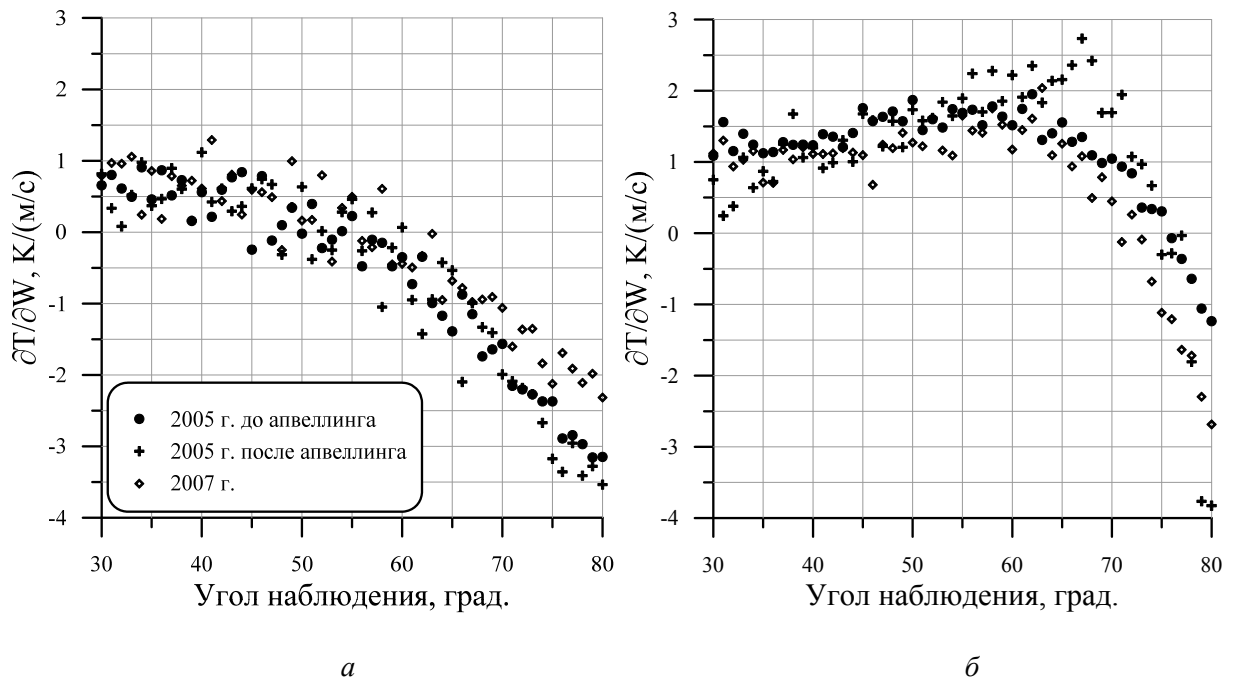


Рисунок 2.9 — Угловая зависимость приращения радиояркой температуры взволнованной водной поверхности от приращения скорости приводного ветра на интервале $5\text{--}6\text{ м/с}$ для вертикальной (а) и горизонтальной (б) поляризаций. Экспериментальные данные за 2005–2007 г.

Угловые зависимости $\partial T_{\text{я}}/\partial W$, представленные на рисунке 2.9, и ветровые зависимости $T_{\text{я.мп}}$ для разных экспериментальных периодов хорошо сходятся между собой. В пользу физической корректности полученных данных говорят следующие,

хорошо известные факты: во-первых, подтверждение независимости собственного излучения взволнованной водной поверхности от скорости приводного ветра на вертикальной поляризации при углах наблюдения в 50–55°; во-вторых, при углах наблюдения в 53–57° на горизонтальной поляризации отмечена наибольшая чувствительность собственного излучения водной поверхности к изменению скорости ветра.

Проведенный в главе 1 анализ показал, что число работ по исследованию радиационно-ветровой зависимости катастрофически мало по сравнению с числом публикаций, посвященных анализу радиояркостной температуры и контрастов, и ограничивается исследованиями, представленными в обобщенном виде в таблице 2.4.

Таблица 2.4 — Ранние исследования крутизны радиационно-ветровой зависимости

Источник	Вертикальные углы наблюдения	Частота	Скорость ветра	Описание эксперимента
Sasaki et al., 1987	10–80° от надира с шагом 10°	1–40 ГГц	0–11 м/с	Научно-исследовательская платформа. Высота 20 м над уровнем моря
Hollinger, 1970, 1971	20–70° от надира с шагом 5–10°	8,36 ГГц, 19,34 ГГц	0,5–13,5 м/с	Научно-исследовательская платформа. Высота не указана
Trokhimovskii et al., 1995	0, 50 и 80° от надира	1,41–37 ГГц	4–11 м/с	Самолет-лаборатория Ан-12. Высота 200–300 м над уровнем моря
Wentz, 1983	49° от надира	6,63 ГГц, 10,63 ГГц, 18 ГГц, 37 ГГц	Широкий диапазон скоростей ветра	Измерения со спутников Seasat и Nimbus-7

Следует обратить особое внимание, что при схожести охваченных в экспериментах частотных диапазонов, интенсивности ветрового воздействия и углов визирования, часть из них выполнена с научно-исследовательских платформ, часть — с борта летательных аппаратов, а результаты [Wentz, 1983] получены при анализе спутниковых данных. Данный факт (различие типов и масштабов усреднения) следует учитывать при проведении сравнительного анализа с результатами, полученными автором настоящей работы.

На рисунке 2.10 представлены результаты сравнения полученных экспериментально радиационно-ветровых зависимостей с данными, представленными в работах [Hollinger, 1970; 1971; Sasaki et al., 1987; Trokhimovskii et al., 1995; Wentz, 1983]. В работах [Trokhimovskii et al., 1995; Hollinger, 1970] представлены данные измерений величины $\partial T_{\text{я}}/\partial W$ для интервала скорости приводного ветра 7–8 м/с, поэтому экспериментальные данные приведены для этого же интервала. Как видно из представленных результатов, результаты вычисления радиационно-ветровой зависимости на основе эксперимента демонстрируют не только качественное, но и в большинстве случаев количественное совпадение с измерениями других авторов, что еще раз подтверждает физическую корректность полученных данных.

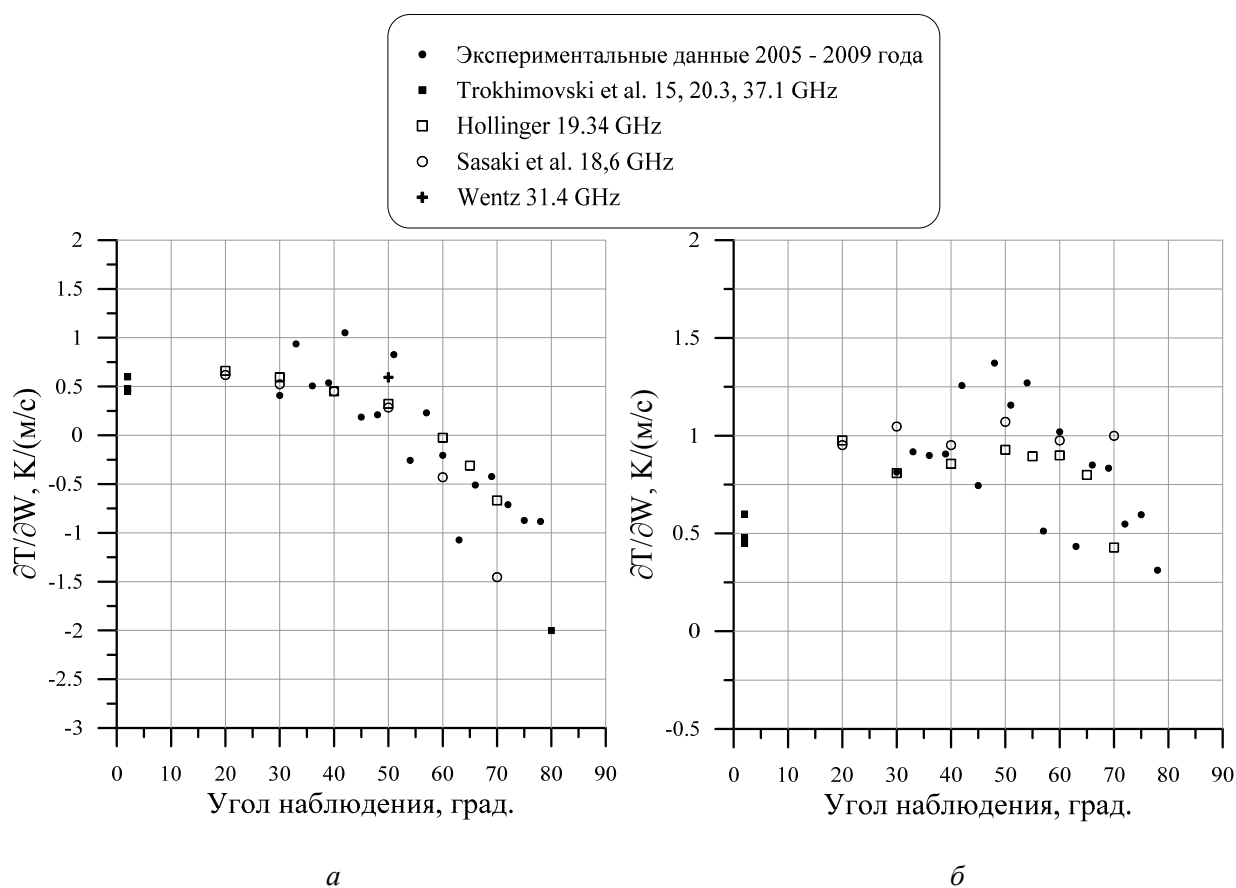


Рисунок 2.10 — Угловая зависимость приращения радиояркой температуры взволнованной водной поверхности от приращения скорости приводного ветра на интервале 7–8 м/с в сравнении с ранними исследованиями для вертикальной (а) и горизонтальной (б) поляризации

Модельный расчет приращения радиояркой температуры водной поверхности

Теоретический расчет величины $\partial T_{\text{я}}/\partial W$, выполненный для последующего сравнения с данными натуральных измерений, потребовал определения модельных значений $T_{\text{я.мп}}$ для скорости ветра в диапазоне 2–18 м/с. Необходимым условием вычислений $T_{\text{я.мп}}$

на основе двухмасштабной модели ветрового волнения является знание формы спектра ветрового волнения. При выполнении расчетов использовались модели спектра гравитационно-капиллярных волн, разработанные Дж.Р. Апелем [ApeI, 1994], Т. Элфохайли [Elfouhaily et al., 1997] и С.Л. Дурденом [Durden, Vesecky, 1985]. Эти модели позволяют проводить расчеты интенсивности собственного излучения водной поверхности (и, как следствие, величины $\partial T_{\text{я}}/\partial W$) для частоты 1–40 ГГц, вертикальных углов наблюдения 0...70–80° и для скорости ветра до 20 м/с. Поскольку далее будут анализироваться результаты модельных расчетов $\partial T_{\text{я}}/\partial W$, основанных на указанных аппроксимациях спектральных кривых, а не самих моделей спектров, для сокращения предлагается использовать обозначение: «расчеты по модели **A(E или D)**» и «модель **A(E или D)**».

Также расчеты радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности были выполнены по полуэмпирической модели ветрового волнения, разработанной Т. Мейсснером и Ф. Вентцем [Meissner, Wentz, 2012] (расчеты по модели **MW**) в результате многолетнего анализа спутниковых измерений, полученных, в основном, с помощью приборов SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager). Данная модель применима на частотах 6,8; 10,7; 18,7 и 37 ГГц для скорости ветра до 20 м/с.

Модельные расчеты были проведены для скоростей ветра W , зарегистрированных в ходе экспериментов, и для средних значений температуры воды $T_{\text{В}}$ и атмосферы $T_{\text{А}}$ (таблица 2.5).

Таблица 2.5 — Статистика основных метеопараметров в экспериментах 2005–2009 гг.

	Год эксперимента			
	2005 до апвеллинга	2005 после апвеллинга	2007	2009
Средняя $T_{\text{В}}$, °С	21,1	12,9	25	20,5
Максимальная $T_{\text{В}}$, °С	22,4	14	26,2	23
Минимальная $T_{\text{В}}$, °С	20,4	12,3	22,8	19
Средняя $T_{\text{А}}$, °С	20,6	18	25,7	16,1
Максимальная $T_{\text{А}}$, °С	22,3	19,4	26,5	16,9
Минимальная $T_{\text{А}}$, °С	19,4	16,3	25,2	14,9
Максимальная скорость ветра W , м/с	11,4	13,2	11,3	17
Минимальная скорость ветра W , м/с	1,7	3,7	2,6	4,7

Сравнение крутизны радиационно-ветровой зависимости, полученной на основе натуральных измерений, с модельными расчетами выполнено с помощью корреляционного

анализа и анализа невязок. Использование таких математических подходов позволяет получить строгую численную оценку при сравнении модельных и экспериментальных данных. С целью выявления корреляционной зависимости выполнена постановка и проверка гипотезы о наличии значимой корреляции **H1** (гипотезы **H0** — отсутствие корреляции) между модельными расчетами и экспериментальными. Постановка и проверка гипотезы, а также результаты моделирования и сравнения приведены в приложении 1.

В таблице 2.6 представлено количество принятых гипотез **H1** в процентном соотношении, а в приложении 1 (рисунки П1.1–П1.4) в графическом виде представлены результаты корреляционного анализа экспериментальных измерений и модельных расчетов радиационно-ветровой зависимости собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности за четыре экспериментальных периода для скоростей ветра от 2 до 17 м/с. Заштрихованная область соответствует области принятия гипотезы **H0**, а свободная область — принятие гипотезы **H1**.

Таблица 2.6 — Количество принятых гипотез о наличии значимой корреляции

Год измерений	Количество принятых гипотез H1, %									
	Модель А		Модель D		Модель E		Модель MW		Общее количество	
	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H
2005 до апвеллинга	100	66,7	100	66,7	100	66,7	100	22,2	100	55,6
2005 после апвеллинга	100	77,8	88,9	77,8	88,9	77,8	88,9	22,2	91,68	63,9
2007	100	88,9	100	88,9	100	77,8	100	11,1	100	66,7
2009	83,3	41,7	83,3	50	83,3	33,3	83,3	25	83,3	37,5

На вертикальной поляризации для всех моделей принята гипотеза **H1** (см. таблицу 2.6), свидетельствующая о наличии значимой корреляции между экспериментальными и модельными данными. Однако есть точки, попавшие в область принятия гипотезы **H0**. Это объясняется тем, что в каждом отдельном эксперименте нет возможности провести измерения во всем диапазоне скоростей ветра, а данные точки получены путем усреднения данных, зарегистрированных при минимальной скорости ветра (в 2009 г. 5–6 м/с) и максимальной скорости ветра (в 2009 г. 16–17 м/с, в 2005 г. 12–13 м/с), когда количество пригодных для усреднения и анализа данных невелико, следовательно, и ошибка будет велика. Таким образом, данные точки можно исключить из анализа и утверждать, что на вертикальной поляризации во всех анализируемых случаях

существует значимая корреляция между экспериментальными измерениями и модельными расчетами крутизны радиационно-ветровой зависимости.

На горизонтальной поляризации имеет место значимая корреляция, т.е. гипотеза **H1** принимается только при скоростях ветра до 11 м/с и только для моделей **A**, **D** и **E**, а для модели **MW** в большинстве случаев принимается гипотеза **H0**. Тот факт, что модельные расчеты и экспериментальные данные коррелированы между собой при скоростях ветра до 11 м/с и не коррелированы при больших скоростях, можно объяснить тем, что при расчете радиотеплового излучения по моделям **A**, **D** и **E** не учитывается влияние пены, обрушений и брызг, которые всегда присутствуют на поверхности моря при ветрах более 10 м/с.

Практически полное отсутствие корреляции для модели **MW** скорее всего является следствием упрощенного вида данной модели для горизонтальной поляризации (линейная аппроксимация), приводящей к тому, что в диапазоне вертикальных углов наблюдения 30–60° результаты экспериментальных измерений совпадают с данными [Meissner, Wentz, 2012], а в области $\geq 60^\circ$ оказываются ближе к расчетам по моделям **D** и **E**.

В приложении 1 (рисунки П1.5–П1.8) представлены рассчитанные значения функции невязки ξ между экспериментальными измерениями и модельными расчетами радиационно-ветровой зависимости для вертикальной и горизонтальной поляризаций. Из графиков видно, что как на вертикальной, так и на горизонтальной поляризации для модели **A** невязка имеет максимальные значения при скорости ветра более 5 м/с, и в тоже время имеет лучший показатель по корреляции (на вертикальной поляризации). Это свидетельствует о том, что ход радиационно-ветровой зависимости, построенный по данной модели, максимально близок к экспериментально полученному, но расходится по абсолютному уровню. Таким образом, использование расчетных значений крутизны радиационно-ветровой зависимости, основанных на спектральной модели **A**, не позволяет интерпретировать данные натурных измерений.

Значения функции невязки для остальных моделей невелики. На вертикальной поляризации минимум невязки и высокий коэффициент корреляции (количество принятых гипотез **H1** более 88 %) соответствует в большинстве случаев модели **MW**. Таким образом, использование данной модели является предпочтительным для интерпретации данных натурных измерений на вертикальной поляризации. Минимальные значения невязки и высокий коэффициент корреляции (количество принятых гипотез **H1** более 50 и 33 %) для моделей **D** и **E** соответствуют случаю горизонтальной поляризации. Также модели **D** и **E** имеют небольшие значения функций невязки и высокий коэффициент корреляции на вертикальной поляризации. Однако с целью интерпретации

данных измерений на горизонтальной поляризации стоит использовать модель **D**, для которой, как показала статистика, большее число принятых гипотез **H1**.

Стоит отметить одну важную особенность модели **MW**. Как уже было описано выше, данная модель разработана на основе многолетнего анализа спутниковых измерений, полученных в основном с помощью приборов SSM/I. Также при создании этой модели в работе [Meissner, Wentz, 2012] были использованы результаты сторонних исследований, полученных как с помощью приборов спутникового и самолетного базирования, так и с океанографических платформ. Пространственное разрешение спутниковых приборов на частоте в 37,5 ГГц составляет порядка нескольких десятков километров, а в описанных натуральных экспериментах пространственное разрешение порядка нескольких десятков метров. Поэтому, с одной стороны, разница в площади поверхности океана, с которой получена информация в модели и эксперименте, может объяснить разницу при сравнении оценок величин $\partial T_{\text{я}}/\partial W$ на горизонтальной поляризации. Но, с другой стороны, имеется полное совпадение оценок величин $\partial T_{\text{я}}/\partial W$ на вертикальной поляризации.

2.2.3. Азимутальная анизотропия восходящего излучения водной поверхности

Собственное радиотепловое излучение взволнованной водной поверхности в значительной степени изотропно. Несмотря на это существует небольшая добавка в виде анизотропного излучения, которая зависит как от скорости ветра, так и от угла между направлением ветра (направлением волнения) и направлением зондирования. Эта добавка получила название «эффект азимутальной анизотропии». Как было отмечено в главе 1, азимутальная анизотропия была обнаружена в 70-х гг. XX века в ходе проводимых в ИКИ экспериментов по радиотепловому зондированию морской поверхности с борта самолета-лаборатории [Беспалова и др., 1979].

Основным выводом исследований [Беспалова и др., 1979, 1982] является то, что эффект азимутальной анизотропии является общим (наблюдается как в морях и океанах, так и в закрытых водоемах), может быть использован для измерения скорости приводного ветра, а так же для дистанционных исследований нелинейных взаимодействий при волнении моря.

*Измерение азимутальной анизотропии водной поверхности
в экспериментах 2005–2016 гг.*

В эксперименте 2005 г. азимутальный скан выполнялся на углах порядка 80° . При таком угле визирования на измеренное радиотепловое излучение сильное влияние оказывают излучение атмосферы и длинные гравитационные волны, последнее связано с низким положением измерительного комплекса (~ 4 м над уровнем моря), вследствие чего ширина пятна диаграммы направленности по уровню половинной мощности имеет малый размер при пересечении водной поверхности. Таким образом, длинные гравитационные волны вносят дополнительное приращение излучения в зависимости от уклона волны, попавшего в луч диаграммы направленности антенны радиометра.

Для исследования эффекта азимутальной анизотропии были выбраны данные, полученные с помощью радиометра-поляриметра Р08 в 2007 г. и Р08П в 2016 г. Радиометр Р08П в эксперименте 2016 г. работал в режиме двух поляризаций (V, H), поэтому для данного периода будут рассмотрены азимутальные вариации только на этих поляризациях.

Как было показано ранее, радиояркая температура, измеренная в условиях эксперимента вблизи поверхности, может быть записана следующим образом: $T_{\text{Я.ЭКСП}} = T_{\text{Я.МП}} + R \cdot T_{\text{Я.АТМ}}$. В наземном эксперименте площадь поверхности воды, с которой собирается информация, составляет несколько тысяч квадратных метров [Сазонов и др. 2016; Sazonov et al., 2016], поэтому распределение физической температуры поверхности воды на данной площади считается изотропным. Таким образом, излучение гладкой водной поверхности $E \cdot T_{0, \text{МП}}$ считается постоянным в течение одного цикла сканирования (~ 25 – 30 мин). Измерение радиояркой температуры атмосферы проводится только при вертикальном сканировании, поэтому нет возможности для фиксированного угла наблюдения оценить горизонтальную неоднородность излучения атмосферы при сканировании по азимуту. В силу этого $T_{\text{Я.АТМ}}$ принимается равной среднему значению за время одного цикла сканирования.

Сделанные ограничения позволяют сделать вывод, что слагаемые $T_{\text{Я.МП}} = E \cdot T_{\text{Я.АТМ}}$ и $R \cdot T_{\text{Я.АТМ}}$ являются постоянными в пределах одного азимутального сканирования и, следовательно, анализировать азимутальную анизотропию можно на основе измеренной радиояркой температуры $T_{\text{Я.ЭКСП}}$, так и на основе вычисленных значений радиоярких контрастов $\Delta T_{\text{Я.МП}}$.

На рисунке 2.11 приведен пример экспериментально полученных азимутальных вариаций собственного микроволнового излучения взволнованной водной поверхности. Изображены три азимутальные записи (для V, H поляризации и 3-го параметра Стокса), сделанных при вертикальном угле наблюдения порядка 50°, скорости приводного ветра 7–8 м/с. Экспериментальные записи аппроксимированы гармоническими функциями по формуле:

$$T_{\text{я}}(\varphi) = \begin{cases} a_0 + a_1 \cdot \cos(\varphi) + a_2 \cdot \cos(2\varphi); & v, h(S1, S2); \\ a_0 + a_1 \cdot \sin(\varphi) + a_2 \cdot \sin(2\varphi); & S3, S4, \end{cases}$$

Анализ экспериментальных измерений азимутальной анизотропии за 2007 г. представлен в работе [Сазонов и др., 2013].

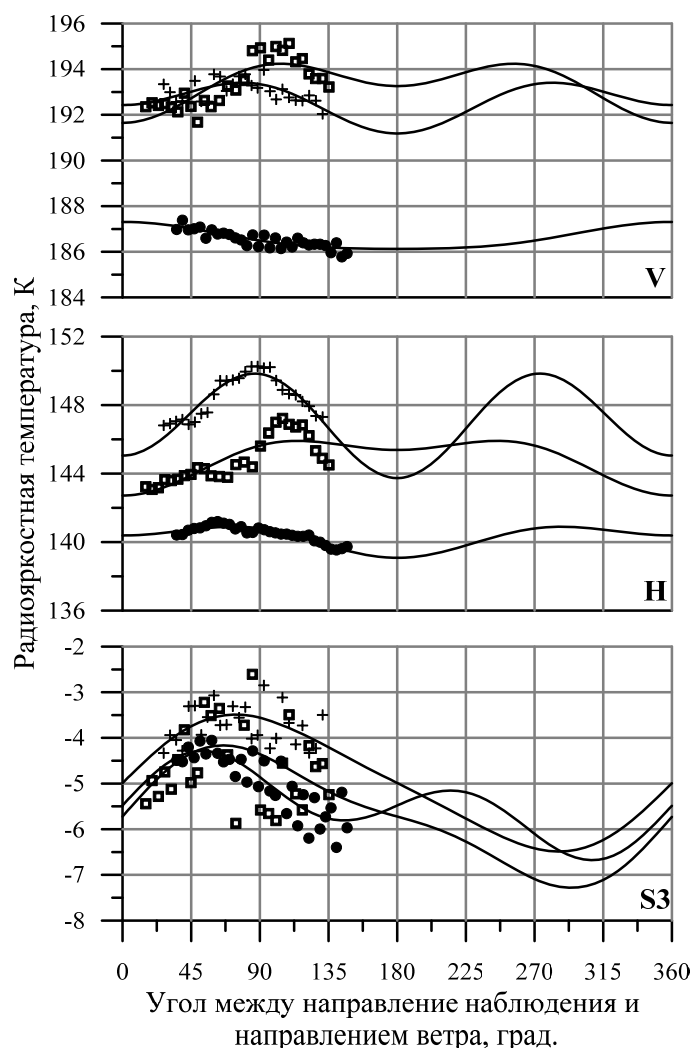


Рисунок 2.11 — Азимутальная анизотропия по данным эксперимента 2007 г. для скорости ветра 7–8 м/с

Из графиков на рисунке 2.11 видно, что есть четкая азимутальная зависимость излучения водной поверхности от азимутального угла наблюдения. Разница в уровнях между тремя азимутальными сканированиями связана с ошибками калибровки радиометра. Для исследования величины анизотропии анализируют только коэффициенты a_1 и a_2 , а коэффициент a_0 , связанный с постоянным уровнем, в данной задаче не рассматривается, поэтому небольшая ошибка в калибровке радиометра по постоянному уровню не оказывает влияния и не вносит ошибок в представленные далее результаты.

Все выбранные для анализа азимутальные измерения были аппроксимированы (см. рисунок 2.11), а коэффициенты анизотропии a_1 и a_2 построены как функция от скорости ветра (рисунок 2.12). Для каждой из скоростей ветра зарегистрировано от 3 до 7 азимутальных сканирований, поэтому коэффициенты анизотропии были усреднены в диапазоне скоростей ветра 1 м/с. Так как количество записей мало (менее 30), то их недостаточно для расчета статистических оценок, поэтому ни доверительный интервал, ни СКО не приводятся и все оценки проводятся на качественном уровне.

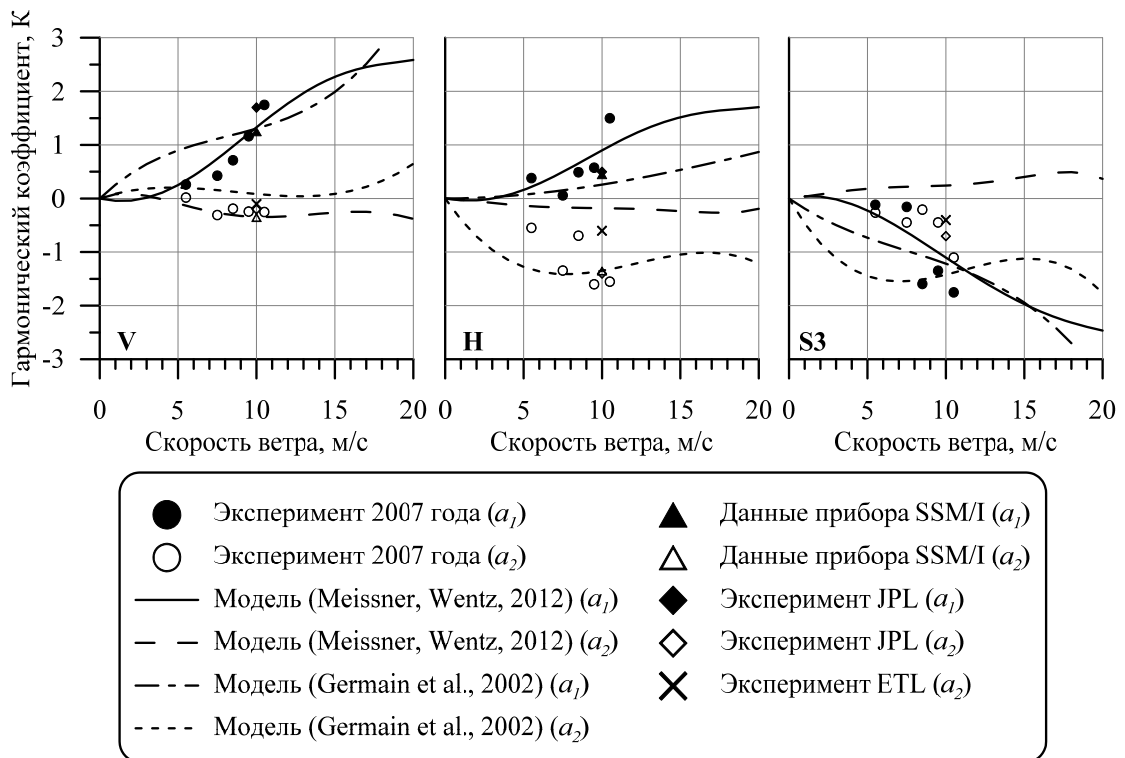


Рисунок 2.12 — Первый и второй гармонические коэффициенты азимутальной анизотропии в зависимости от скорости приводного ветра в сравнении с модельными расчетами и экспериментами. Данные эксперимента 2007 г.

Для сокращения записи далее будут использовано обозначение: модель [Germain et al., 2002] — G.

На рисунке 2.12 приведены зависимости первого и второго гармонического коэффициента азимутальной анизотропии от скорости ветра в сравнении с двумя моделями (**MW** и **G**) и аналогичными экспериментами. Расчет по модели **MW** выполнен для угла 50° , расчет по модели **G** только для 53° , измерения прибором SSM/I — 53° , эксперимент JPL — 55° , эксперимент ETL — 55° . В работах [Germain et al., 2002; Meissner, Wentz, 2012] не рассматривается зависимость коэффициентов азимутальной анизотропии от температуры воды и воздуха, поэтому в настоящей работе будем считать, что анизотропия не зависит от температуры системы океан-атмосфера.

На рисунке 2.13 приведены зависимости первого и второго гармонического коэффициента азимутальной анизотропии от скорости ветра в сравнении с моделью **MW**. Коэффициенты показаны только для вертикальной и горизонтальной поляризации при углах наблюдения 10, 25, 40, 55 и 65° . Дополнительно показаны расчеты по модели, предложенной в работе [Поспелов, 2004] для надирного угла наблюдения.

Как видно из рисунков 2.12 и 2.13, величина азимутальной анизотропии увеличивается при возрастании скорости ветра. В штиль поверхность воды выглажена, и интенсивность ее излучения определяется в основном физической температурой. При появлении ветра к собственному излучению воды добавляется излучение, связанное с гравитационно-капиллярным волнением, которое чувствительно к мгновенным значениям скорости ветра. На рисунке 2.13 видно, что при значениях скорости ветра порядка 12–15 м/с увеличение (по абсолютному уровню) коэффициентов анизотропии a_1 и a_2 замедляется (это справедливо для экспериментальных данных). Это связано с наличием пены и обрушений на воде при больших скоростях ветра (более 10–12 м/с).

На рисунке 2.13 представлены ветровые зависимости коэффициентов анизотропии при наблюдении на различных вертикальных углах. По этим графикам можно сделать следующие выводы:

- при наблюдении вблизи надирного угла (графики для 10°) величины коэффициента a_1 для обеих поляризаций невелики и азимутальная анизотропия восходящего излучения связана в основном с углом между направлением ветра и направлением наблюдения. В предельном случае, т.е. при наблюдении строго в надир, величины коэффициента a_1 должны быть равны нулю. Как описано в работе [Поспелов, 2004] при надирных наблюдениях азимутальная анизотропия есть по своей сути поляризационная анизотропия;

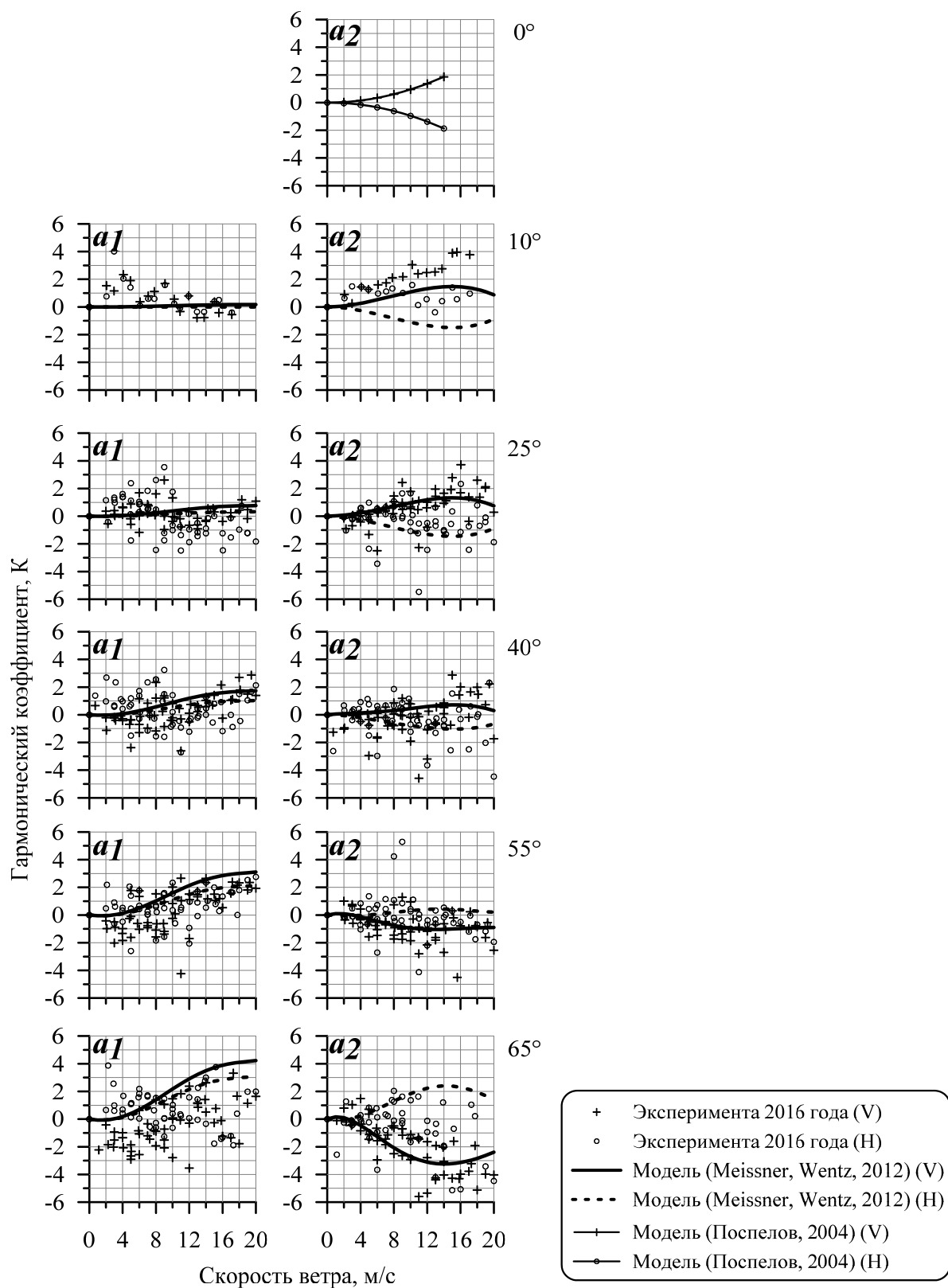


Рисунок 2.13 — Первый и второй гармонические коэффициенты азимутальной анизотропии в зависимости от скорости приводного ветра в сравнении с модельными расчетами. Данные эксперимента 2016 года.

- при увеличении вертикального угла наблюдения ветровая зависимость коэффициентов a_1 для обеих поляризаций увеличивается с возрастанием

скорости ветра, и чем больше вертикальный угол наблюдения, тем больше наклон ветровой зависимости. Это происходит вследствие асимметрии характеристик излучения взволнованной морской поверхности при зондировании по направлению ветра и против. Также при увеличении вертикального угла наблюдения ветровая зависимость коэффициентов a_2 уменьшается практически до нуля при 55° (см. рисунок 2.13, график 55°) и затем возрастает, но с обратным знаком. Это еще раз доказывает известный факт, что микроволновое излучение на вертикальной поляризации при углах зондирования порядка $50\text{--}55^\circ$ наименее чувствительно к ветровому воздействию на поверхность (однако это является неверным в случае горизонтальной поляризации!)

Сравнение экспериментальных данных с модельными расчетами и другими экспериментами (см. рисунок 2.12) показало что:

- на вертикальной поляризации полученные в эксперименте зависимости коэффициентов азимутальной анизотропии a_1 и a_2 от скорости приводного ветра совпадают с расчетами по модели **MW** и с данными других экспериментов. Также зависимость коэффициента a_2 совпадает с расчетами по модели **G**, а коэффициент a_1 совпадает с данной моделью только при скорости ветра в 10 м/с;
- на горизонтальной поляризации и для третьего параметра Стокса зависимости коэффициентов a_1 и a_2 сходятся с данными других экспериментов. С расчетами по обеим моделям сходятся только зависимости коэффициента a_1 (с моделью **G** в меньшей степени). Ветровая зависимость коэффициента a_2 сходится с расчетами по модели **G** только при скоростях ветра ~ 10 м/с, а с моделью **MW** не совпадает.

Сравнение экспериментальных данных с модельными расчетами при различных вертикальных углах наблюдения (рисунок 2.13) показало что:

- коэффициенты анизотропии a_1 сходятся с расчетами по модели **MW**, однако чем больше вертикальный угол наблюдения, тем больше модель переоценивает данные эксперимента;
- коэффициенты анизотропии a_2 сходятся с модельным расчетом в основном только для вертикальной поляризации (тоже самое было обнаружено при

анализе радиационно-ветровой зависимости, исследованной в работах [Сазонов, 2017а; Сазонов и др., 2016; Sazonov et al., 2016].

В общем, модель **MW** адекватно описывает данные наблюдений в микроволновом диапазоне на вертикальной поляризации, несмотря на то, что угловая зависимость коэффициентов азимутальной анизотропии получена с помощью интерполяции по данным спутниковых и наземных наблюдений.

2.3. Выводы по главе 2

Представленные в данной 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 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.
- Очевидно наличие сильной зависимости излучения взволнованной водной поверхности от температуры воды, скорости и направления приводного ветра. Это доказывают представленные модельные расчеты и экспериментальные исследования.
- Высокая степень совпадения между экспериментом и модельными расчетами свидетельствует о корректности методик выполнения эксперимента и обработки данных.
- Также высокая степень корреляции экспериментальных данных с модельными расчетами и результатами аналогичных экспериментов свидетельствуют, что наблюдаемые зависимости собственного излучения взволнованной водной поверхности носят общий характер. Поэтому при выполнении аналогичного эксперимента в любой акватории (море, океан, большое озеро) следует ожидать повторение представленных зависимостей.
- Качественные и количественные (в меньшей степени) совпадения экспериментальных данных и расчетов по модели **MW**, которая построена

(в основном) по измерениям прибора SSM/I, позволяет заключить, что при различных способах усреднения (для SSM/I — усреднение по площади, для эксперимента — по времени) зависимости собственного излучения взволнованной водной поверхности от метеорологических параметров совпадают. Это, в свою очередь, еще раз доказывает эргодичность процесса микроволнового излучения взволнованной водной поверхности.

- Радиационно-ветровая зависимость 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.
- Азимутальная анизотропия, как по экспериментальным, так и по модельным данным, возрастает как при увеличении угла наблюдения, так и при увеличении скорости ветра. При скорости ветра более 12–13 м/с анизотропия практически не изменяется, 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.

ГЛАВА 3. Разработка многопараметрической регрессионной модели радиоизлучения взволнованной водной поверхности

В главе 2 был проведен анализ радиационно-ветровой зависимости и азимутальной анизотропии собственного микроволнового излучения взволнованной водной поверхности. Корреляционный анализ показал, что существует значимая корреляция между экспериментальными и модельными данными, однако анализ невязок показал, что есть расхождения по абсолютному уровню. Качественный анализ азимутальной анизотропии показал, что экспериментальные данные сходятся с модельным расчетом в основном только для вертикальной поляризации. Так как ни одна из используемых моделей не описывает результаты экспериментальных наблюдений с достаточным уровнем достоверности, было принято решение разработать функциональное представление для описания радиационно-ветровой зависимости [Сазонов, 2017б] и азимутальной анизотропии.

Построение функциональной зависимости (модели) произведено на основе ограниченного набора экспериментальных данных, поэтому при моделировании были поставлены ограничения.

1. При моделировании радиационно-ветровой зависимости ограничения следующие:

- для построения модели использованы данные, полученные в 2005 и 2007 гг. радиометром R08 на вертикальной и горизонтальной поляризациях;
- так как вклад атмосферы в величину $\partial T_{\text{я}}/\partial W$ пренебрежимо мал, то зависимость от состояния атмосферы не рассматривается;
- измерения выполнены только с платформы в Черном море, т.е. при одинаковом значении солености, поэтому зависимость от солености воды не рассматривается;
- измерения выполнены в основном при условиях, что температура воды меньше температуры воздуха, поэтому стратификация не учитывается;
- модель строится на данных, которые усреднены по азимутальному углу наблюдения, поэтому азимутальная зависимость не рассматривается.

2. При моделировании азимутальной анизотропии были поставлены следующие ограничения:

- для построения модели использован большой набор данных, полученных в 2016 г.;

- так как прибор P08П работал в режиме двух поляризаций, то моделирование производится только для вертикальной и горизонтальной поляризаций;
- экспериментальные данные получены при достаточно стабильных метеоусловиях, поэтому зависимость от состояния атмосферы и стратификация не рассматриваются;
- не рассматривается зависимость от солености и температуры воды (в течение эксперимента температура воды была стабильной 21 °С).

С целью упрощения моделирования и введения безразмерных переменных выполнено нормирование переменных. Для радиационно-ветровой зависимости это — угол наблюдения, интервал скорости ветра и температура воды. Для азимутальной анизотропии — скорость ветра и вертикальный угол наблюдения. Формулы для преобразования имеют следующий вид:

$$x^0 = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2}, \quad (3.1)$$

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}, \quad (3.2)$$

где Δx — интервал варьирования по оси x ; x^0 — центр новой системы. Переход от координат x_1, x_2, \dots, x_n к новой безразмерной системе координат $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n$ осуществляется линейным преобразованием координат:

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - x^0}{\Delta x}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3.3)$$

где n — количество значений переменной x . В нормированном виде верхний уровень равен +1, нижний уровень равен -1 ($-1 \leq \hat{x}_i \leq 1$), координаты центра равны нулю и совпадают с началом координат безразмерной системы. Обратный переход выполняется по формуле $x_i = \hat{x}_i \Delta x + x^0$. В таблице 3.1 приведены максимальные и минимальные значения переменных (угла наблюдения, интервала скорости ветра и температуры воды), а также их нормировочные коэффициенты.

Таблица 3.1 — Нормировочные коэффициенты для переменных модели

Переменная	Максимум	Минимум	Интервал варьирования Δx по оси x	Центр новой системы x^0
<i>Радиационно-ветровая зависимость</i>				
Угол наблюдения, град	80	30	25	55
Интервал скорости ветра, м/с	2,5	12,5	5	7,5
Температура воды, °С	12,5	25	6,25	18,75

Переменная	Максимум	Минимум	Интервал варьирования Δx по оси x	Центр новой системы x^0
<i>Азимутальная анизотропия</i>				
Вертикальный угол наблюдения, град	65	0	32,5	32,5
Скорость ветра, м/с	0	20	10	10

3.1. Модель радиационно-ветровой зависимости

3.1.1. Угловая зависимость

На рисунке 3.1 представлена угловая зависимость приращения яркостной температуры от приращения скорости ветра ($\partial T_{\text{Я}}/\partial W$) для частоты в 37,5 ГГц в интервале скорости ветра 4–5 м/с. На основе полученных экспериментальных зависимостей подобраны аппроксимации, которые с высоким показателем коэффициента корреляции описывают имеющиеся данные. Ход зависимости на рисунке 3.1 имеет нелинейный характер, поэтому было принято решение аппроксимировать экспериментальные данные полиномом. Выполнив серию аппроксимаций, используя полиномы разных степеней, было установлено, что для горизонтальной поляризации экспериментальные данные описываются полиномом третьей степени с коэффициентом корреляции $r = 0,96$ и увеличение степени полинома не приводит к значительному увеличению r . Для вертикальной поляризации экспериментальные данные описываются полиномом второй степени с $r = 0,96$. Таким образом, для вертикальной поляризации оптимальной аппроксимирующей функцией стал полином второго порядка (3.4), а для горизонтальной поляризации — полином третьего порядка (3.5):

$$\frac{\partial T_V(\theta_N, Wc_N, T_{BN})}{\partial W} = \sum_{i=0}^2 \theta_N^i \cdot \alpha_i^V(Wc_N, T_{BN}), \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial T_H(\theta_N, Wc_N, T_{BN})}{\partial W} = \sum_{i=0}^3 \theta_N^i \cdot \alpha_i^H(Wc_N, T_{BN}), \quad (3.5)$$

где i — номер члена полинома; α_i^p — коэффициент полинома угловой зависимости; p — поляризация; θ_N — вертикальный угол наблюдения в нормированной системе координат. Графики на рисунке 3.1 выполнены в исходной системе координат. Все полученные коэффициенты полиномов (3.4) и (3.5) приведены на рисунке 3.2 как зависимость от интервала скорости ветра.

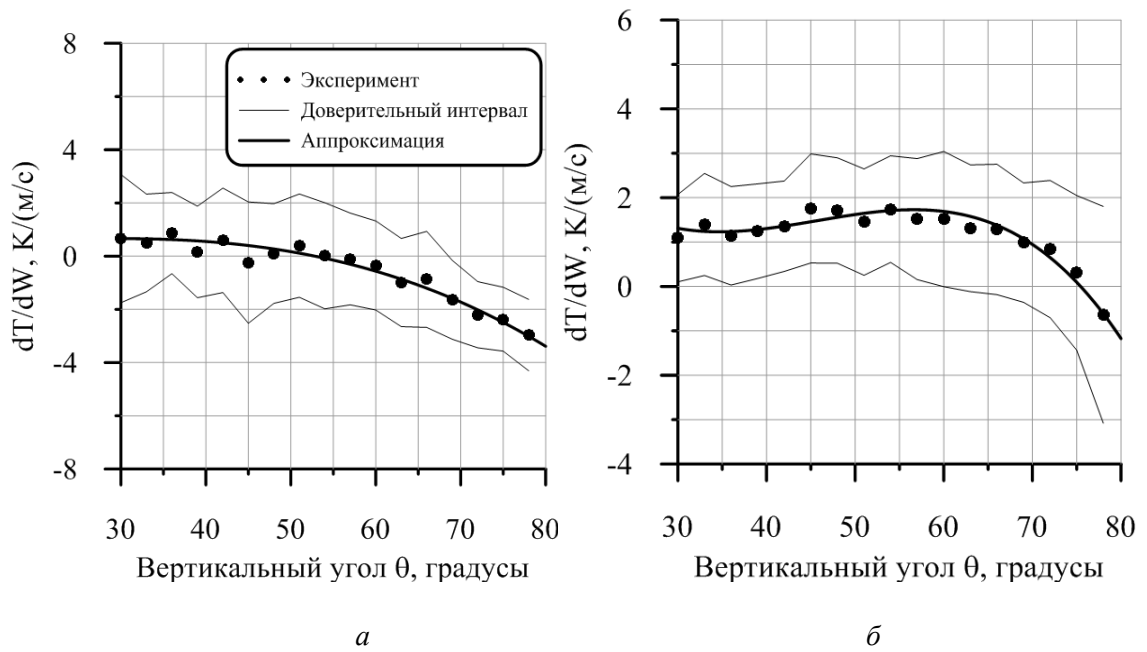


Рисунок 3.1 — Экспериментально полученные значения крутизны радиационно-ветровой зависимости на различных углах наблюдения в интервале скорости ветра 4–5 м/с в эксперименте 2005 г.: *а* — вертикальная поляризация; *б* — горизонтальная поляризация. Доверительный интервал построен для уровня достоверности 0,9. Температура воды 21 °С

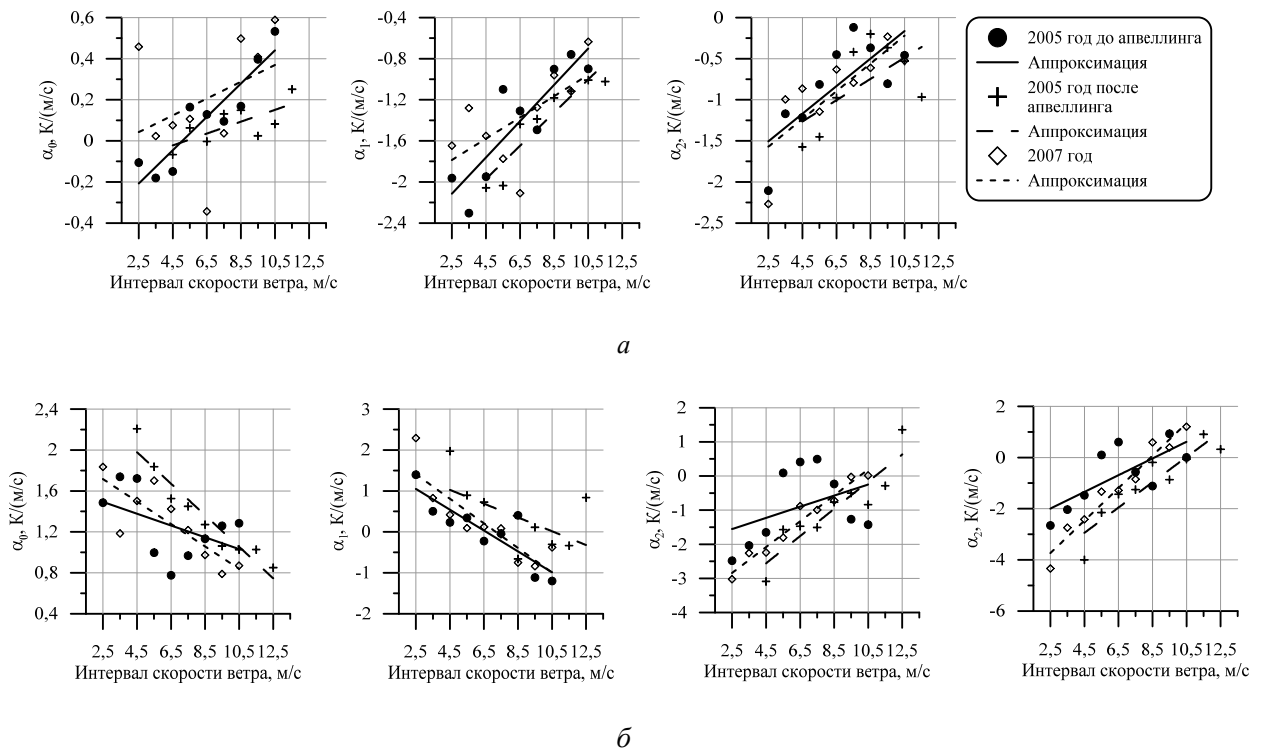


Рисунок 3.2 — Коэффициенты полиномов 1 и 2 угловой зависимости как функция от интервала скорости ветра: *а* — вертикальная поляризация; *б* — горизонтальная поляризация

3.1.2. Ветровая зависимость

На графиках (рисунок 3.2) прослеживается четкая зависимость коэффициентов α_i^p от интервала скорости ветра Wc . Предполагая, что зависимость линейна, выполнена аппроксимация коэффициентов α_i^p линейной функцией вида:

$$\alpha_i^p(Wc_N, T_{BN}) = \delta_0^p(T_{BN}) + Wc_N \delta_1^p(T_{BN}) \quad (3.6)$$

отдельно для каждого из трех экспериментальных периодов, где δ_i^p — коэффициент полинома ветровой зависимости, Wc_N — интервал скорости ветра в нормированной системе координат. Полученные коэффициенты приведены на рисунке 3.3 как зависимость от температуры воды в исходной системе координат.

3.1.3. Температурная зависимость

Полученные в предыдущем разделе коэффициенты ветровой зависимости δ_i^p для трех экспериментальных периодов построены как зависимость от температуры воды. Эти графики приведены на рисунке 3.3.

Как для вертикальной (см. рисунок 3.3а), так и для горизонтальной (см. рисунок 3.3б) поляризации четкая линейная зависимость коэффициентов δ_i^p от температуры прослеживается только в некоторых случаях: например, графики для коэффициентов $\alpha_0^V - \delta_0$ и $\alpha_1^H - \delta_1$. Также наблюдается зависимость, близкая к линейной, для коэффициентов $\alpha_2^V - \delta_1$ и $\alpha_0^H - \delta_0$. В остальных случаях по трем точкам сложно сказать, имеет ли место линейная или нелинейная зависимость, поэтому было принято решение аппроксимировать все коэффициенты δ_i^p линейной функцией:

$$\delta_i^p(T_{BN}) = \gamma_0^p + \gamma_1^p T_{BN}, \quad (3.7)$$

где γ_i^p — коэффициенты температурной зависимости (таблица 3.2); T_{BN} — температура воды в нормированной системе координат.

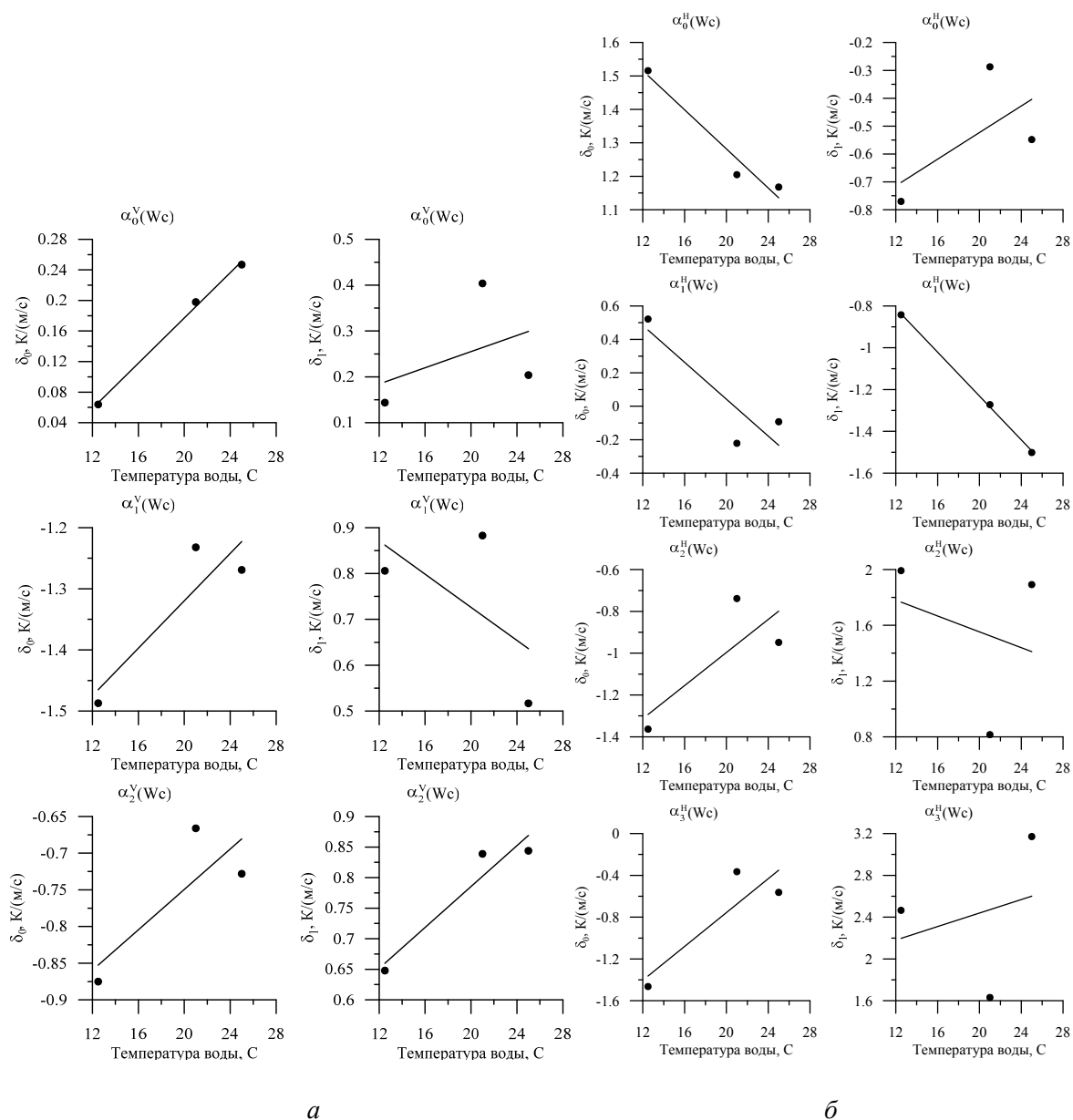


Рисунок 3.3 — Коэффициенты полинома (точки) ветровой зависимости как функция от температуры воды и их аппроксимация: *a* — вертикальная поляризация; *b* — горизонтальная поляризация

Таблица 3.2 — Коэффициенты температурной зависимости

	Коэффициент α_0^V		Коэффициент α_1^V		Коэффициент α_2^V			
	γ_0	γ_1	γ_0	γ_1	γ_0	γ_1		
δ_0	0,159	0,093	-1,344	0,121	-0,767	0,086		
δ_1	0,244	0,055	0,749	-0,113	0,764	0,105		
	Коэффициент α_0^H		Коэффициент α_1^H		Коэффициент α_2^H		Коэффициент α_3^H	
	γ_0	γ_1	γ_0	γ_1	γ_0	γ_1	γ_0	γ_1
δ_0	1,318	-0,183	0,111	-0,344	-1,046	0,247	-0,857	0,506
δ_1	-0,553	0,149	-1,166	-0,327	1,589	-0,178	2,399	0,202

3.1.4. Регрессионная модель микроволнового излучения взволнованной водной поверхности

Предлагаемая модель микроволнового излучения взволнованной водной поверхности **MiROSE** (Microwave Rough Ocean Surface Emission model) описывает результаты наблюдений на частоте 37,5 ГГц (длина волны ~8 мм) в диапазоне следующих условий: вертикальный угол наблюдения 30–80°, температура воды 12,5–25 °С и скорость ветра 3–13 м/с.

Используя формулы 3.4–3.7 и коэффициенты из таблицы 3.2 можно рассчитать угловую зависимость приращения яркостной температуры от приращения скорости ветра $\partial T_{\text{я}}(\theta, W, T_{0.\text{МП}})/\partial W$ при заданных значениях температуры воды и интервала скорости ветра, радиояркостный контраст $\Delta T_{\text{я}}(\theta, W, T_{0.\text{МП}})$ (рисунок 3.4) и радиояркостную температуру $T_{\text{я}}(\theta, W, T_{0.\text{МП}})$. Радиояркостный контраст вычисляется как

$$\Delta T_{\text{я}}(\theta, W, T_{0.\text{МП}}) = \sum_{i=2.5}^n \partial T_{\text{я}}(\theta, W_i, T_{0.\text{МП}})/\partial W_i, \text{ где } i \text{ — интервал скорости ветра; } n \text{ равно от}$$

2,5 до 12,5 м/с в зависимости от скорости ветра W . Результаты экспериментальных наблюдений и достаточное количество публикаций как зарубежных, так и отечественных свидетельствуют, что при скоростях ветра менее 2–3 м/с радиометрические приборы либо не чувствительны к изменению восходящего излучения, либо этого изменения не происходит и, следовательно, можно вычислять контраст, начиная со скоростей ветра в 2 или 3 м/с. При скоростях ветра менее 2 м/с в данной модели $\partial T_{\text{я}}(\theta, W, T_{0.\text{МП}})/\partial W = 0$ и $\Delta T_{\text{я}}(\theta, W, T_{0.\text{МП}}) = 0$.

Радиояркостная температура вычисляется как $T_{\text{я}}(\theta, W, T_{0.\text{МП}}) = T_{\text{я.гл}}(\theta, T_{0.\text{МП}}) + \Delta T_{\text{я}}(\theta, W, T_{0.\text{МП}})$, где $T_{\text{я.гл}}(\theta, T_{0.\text{МП}})$ — радиояркостная температура гладкой водной поверхности, рассчитываемая теоретически. Для расчетов излучения гладкой водной поверхности на частоте 37,5 ГГц применяется модель диэлектрической проницаемости [Stogrin, 1971] с изменениями, которая рекомендована для расчетов в работах [Садовский и др., 2013, 2014].

На рисунке 3.4 представлены рассчитанные по модели **MiROSE** угловые зависимости радиояркостных контрастов $\Delta T_{\text{я}}(\theta, W, T_{0.\text{МП}})$ на вертикальной и горизонтальной поляризациях для скоростей ветра 3, 8 и 13 м/с и температуры воды 13, 20 и 25 °С. Графики радиояркостных контрастов наглядно демонстрируют известные явления:

- наличие сильной угловой зависимости радиояркостного контраста;

- увеличение интенсивности излучения при увеличении скорости ветра (при фиксированном угле наблюдения θ) — чем больше скорость ветра, тем больше изменяется радиояркостный контраст;
- независимость излучения водной поверхности от ветрового воздействия на вертикальной поляризации для углов в диапазоне $55\text{--}60^\circ$;
- сильная чувствительность горизонтально поляризованного излучения к скорости ветра при углах наблюдения $55\text{--}65^\circ$.

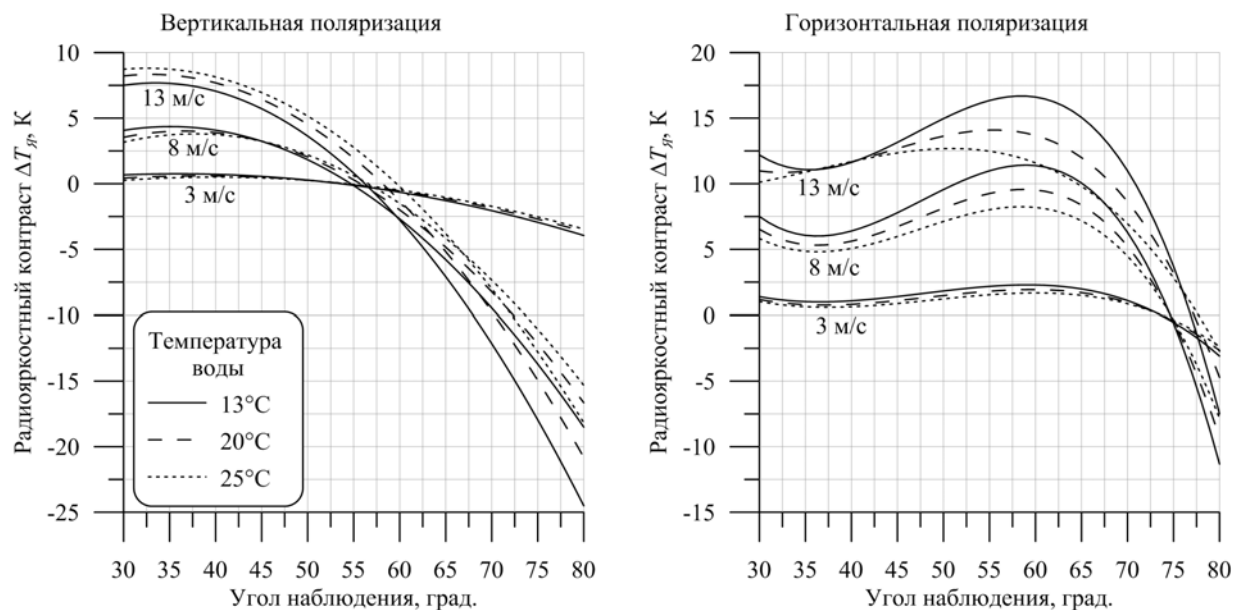


Рисунок 3.4 — Радиояркостный контраст, рассчитанный по модели MiROSE, для вертикальной и горизонтальной поляризаций. Температура воды 13, 20 и 25 °С, скорость ветра 3, 8 и 13 м/с

3.1.5. Корреляционное соответствие: модель-эксперимент

С целью проверки точности аппроксимации проведен корреляционный анализ между исходными (экспериментальными) данными и расчетами по модели **MiROSE**. На рисунке 3.5 представлены корреляционные зависимости для каждого экспериментального периода. Как показано в приложении 1, наличие значимой корреляции обусловлено величиной коэффициента корреляции $r > 0,281$ при уровне достоверности $\alpha = 5\%$. Минимальное и максимальное значение r по расчетам соответствует периоду измерений 2005 г. до апвеллинга для горизонтальной ($r = 0,5874$) и вертикальной ($r = 0,8947$) поляризаций.

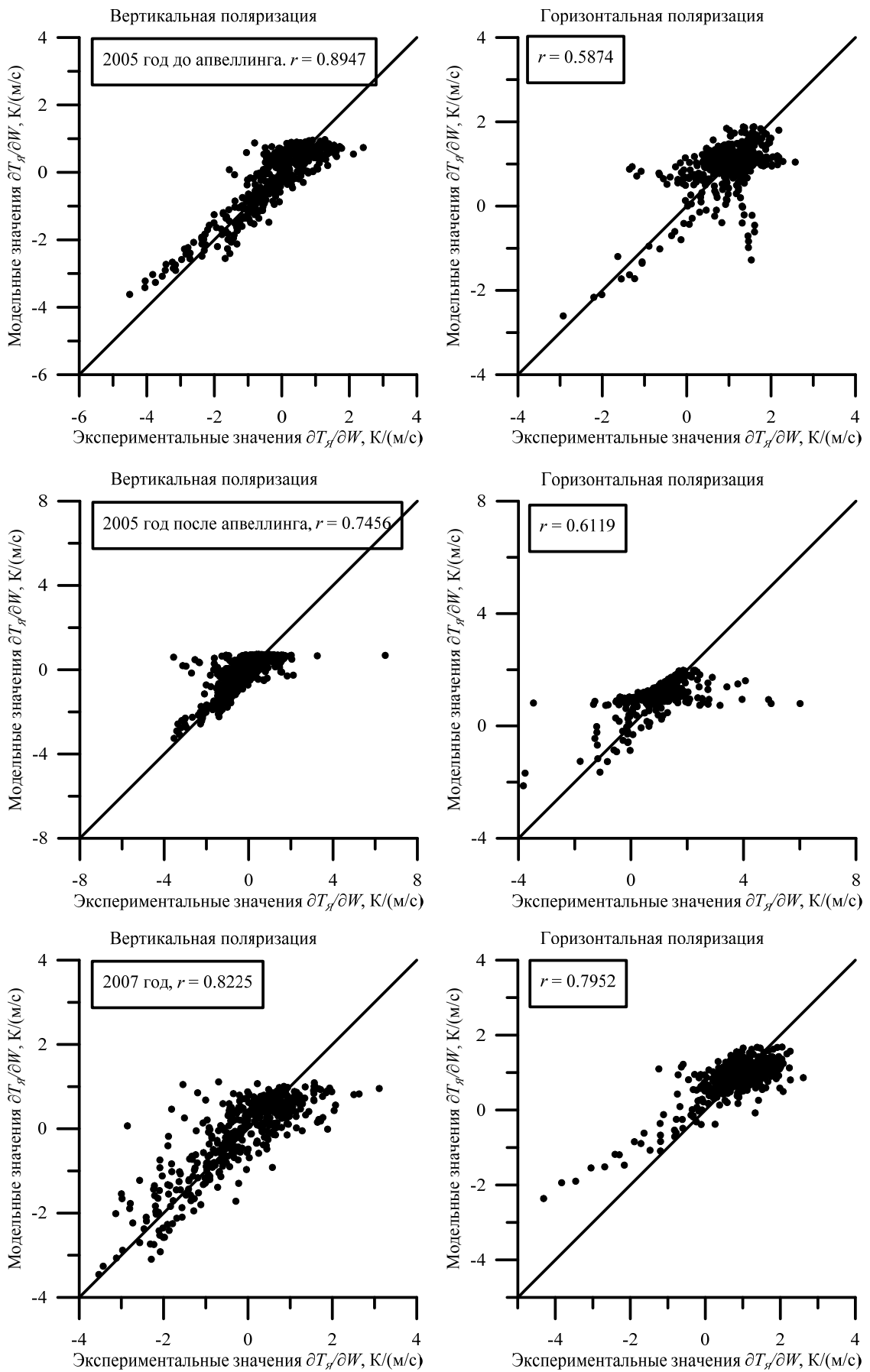


Рисунок 3.5 — Корреляция между экспериментальными данными и расчетами по модели **MiROSE**

Как видно на рисунке 3.5, есть сильные отклонения от корреляционной прямой, например, для горизонтальной поляризации (период 2005 г. до и после апвеллинга) и для вертикальной поляризации (период 2005 г. после апвеллинга). Однако таких выбросов мало и они могут быть связаны с ошибками измерений.

Общий уровень корреляции между экспериментом и моделью **MiROSE** составляет 0,8208 для вертикальной и 0,6606 для горизонтальной поляризации, поэтому разработанная модель адекватно описывает данные измерений и может быть использована для получения предварительных оценок скорости ветра и температуры поверхности воды, которые будут использоваться для решения различных задач дистанционного зондирования.

3.2. Модель азимутальной анизотропии

3.2.1. Азимутальная зависимость

Как было изложено в п. 2.3 главы 2, азимутальная зависимость радиояростной температуры на вертикальной и горизонтальной поляризациях (см. рисунок 2.12) аппроксимирована гармоническими функциями:

$$\Delta T_{\text{Я.Аз}}(\varphi, W_N, \theta_N) = a_1(W_N, \theta_N) \cdot \cos(\varphi) + a_2(W_N, \theta_N) \cdot \cos(2\varphi) \quad (3.8)$$

в которых величина анизотропии связана с коэффициентами a_1 и a_2 , а коэффициент a_0 , связанный с постоянным уровнем, в данной задаче не рассматривается.

В 2016 г. было накоплено 474 азимутальных записей изменения радиояростной температуры на каждом из пяти вертикальных углах наблюдения (10, 25, 40, 55 и 60°). Графики гармонических коэффициентов a_1 и a_2 , построенные как функция от скорости ветра, приведены в главе 2 на рисунке 2.14.

3.2.2. Ветровая зависимость

В главе 2 были сделаны выводы, что при увеличении вертикального угла наблюдения ветровая зависимость коэффициентов a_1 для обеих поляризаций увеличивается с возрастанием скорости ветра и что при увеличении вертикального угла наблюдения ветровая зависимость коэффициентов a_2 уменьшается практически до нуля при 55° (см. рисунок 2.14, график 55°) и затем возрастает, но с обратным знаком.

С целью описать ветровую зависимость гармонических коэффициентов азимутальной анизотропии была проведена серия аппроксимаций полиномами различных

степеней. Было установлено, что увеличение степени полинома больше третьей не приводит к значительному увеличению коэффициента корреляции между гармоническими коэффициентами и аппроксимацией. Поэтому было принято решение использовать полином третьей степени:

$$\alpha_i^p(W_N, \theta_N) = \sum_{i=0}^3 W_N^i \cdot \beta_i^p(\theta_N), \quad (3.9)$$

где i — номер члена полинома; β_i^p — коэффициент полинома ветровой зависимости; p — поляризация; W_N — скорость ветра в нормированной системе координат. Аппроксимации гармонических коэффициентов азимутальной анизотропии приведены на рисунке 3.6. Для надирного угла наблюдения взяты результаты из работы [Поспелов, 2004] и тоже аппроксимированы полиномом (3.9).

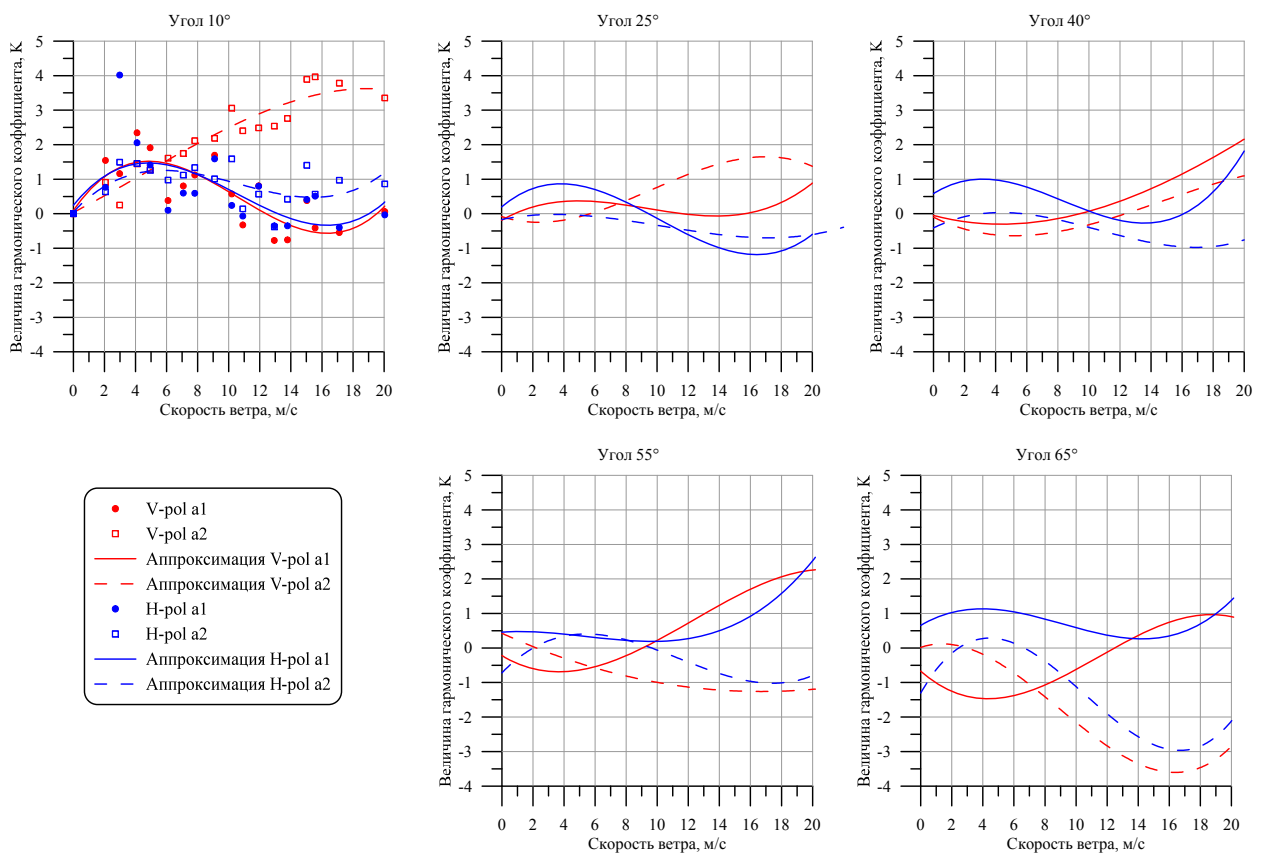


Рисунок 3.6 — Аппроксимации по формуле (3.8) первого и второго гармонического коэффициента азимутальной анизотропии в зависимости от скорости приводного ветра по данным эксперимента 2016 г.

Все полученные коэффициенты полиномов (3.9) приведены на рисунке 3.7 как зависимость от вертикального угла наблюдения.

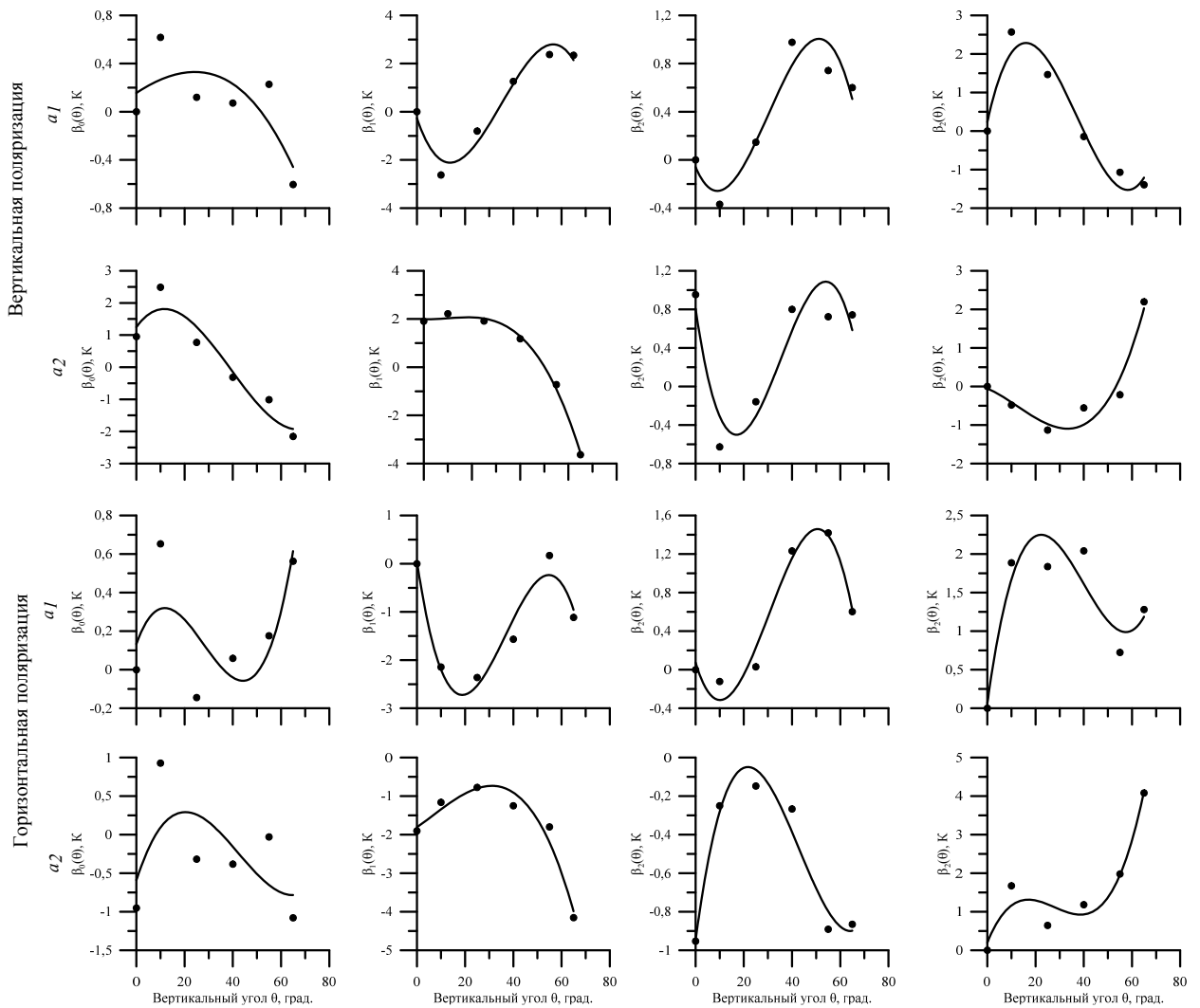


Рисунок 3.7 — Коэффициенты полинома (точки) ветровой зависимости как функция от вертикального угла наблюдения и их аппроксимация для вертикальной и горизонтальной поляризаций

3.2.3. Угловая зависимость

На графиках (см. рисунок 3.7) представлены угловые зависимости коэффициентов $\beta_i^p(\theta)$. Данные зависимости имеют нелинейный характер, поэтому аппроксимированы полиномом третьей степени:

$$\beta_i^p(\theta_N) = \sum_{i=0}^3 \theta_N^i \cdot \gamma_i^p(\theta_N), \quad (3.10)$$

где i — номер члена полинома; γ_i^p — коэффициент полинома угловой зависимости; p — поляризация; θ_N — вертикальный угол наблюдения в нормированной системе координат. Результирующие значения коэффициентов γ_i^p приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 — Коэффициенты угловой зависимости

Поляризация	Гармонический коэффициент		γ_0	γ_1	γ_2	γ_3	R^2
V	a_1	β_0	0,3048	-0,2130	-0,4559	-0,0942	0,565
		β_1	-0,1116	5,5091	1,0505	-4,3023	0,952
		β_2	0,4815	1,4420	-0,2580	-1,1599	0,911
		β_3	0,9958	-4,1867	-1,4838	3,4673	0,940
	a_2	β_0	0,6000	-3,1265	-0,9376	1,5417	0,917
		β_1	1,7885	-1,5314	-2,5677	-1,2392	0,995
		β_2	0,1027	2,0364	0,5928	-2,1483	0,830
		β_3	-1,0939	-0,0926	2,0786	1,1347	0,934
H	a_1	β_0	0,0540	-0,5242	0,3205	0,7653	0,500
		β_1	-1,9169	3,1831	1,4622	-3,6857	0,930
		β_2	0,7114	2,1134	-0,3608	-1,8379	0,960
		β_3	1,9945	-1,4420	-1,3691	2,0048	0,851
	a_2	β_0	0,0920	-0,9452	-0,7799	0,8489	0,355
		β_1	-0,7400	-0,1886	-2,1588	-0,9012	0,951
		β_2	-0,1857	-0,7401	-0,7378	0,7646	0,954
		β_3	0,9983	-0,7122	1,1623	2,6764	0,933

3.2.4. Регрессионная модель микроволнового излучения взволнованной водной поверхности с учетом эффекта азимутальной анизотропии

Предлагаемое дополнение модели **MiROSE-a** 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 $0-65^\circ$ и скорость ветра $0-20$ м/с.

Используя формулы (3.8)–(3.10) и коэффициенты из таблицы 3.3 можно рассчитать азимутальную зависимость приращения яркостной температуры $\Delta T_{Я.Аз}(\varphi, W, \theta)$ при заданных значениях скорости ветра и вертикального угла наблюдения.

Полная радиояркостная температура взволнованной водной поверхности по предлагаемой модели **MiROSE-a** вычисляется как: $T_{Я}(\theta, W, T_{0.МП}, \varphi) = T_{Я.ГЛ}(\theta, T_{0.МП}) + T_{Я}(\theta, W, T_{0.МП}) + \Delta T_{Я.Аз}(\varphi, W, \theta)$. На рисунке 3.8 представлены рассчитанные по модели **MiROSE-a** азимутальные зависимости приращения радиояркостной температуры $\Delta T_{Я.Аз}(\varphi, W, \theta)$ на вертикальной и горизонтальной поляризациях для скоростей ветра 3, 10 и 18 м/с и вертикального угла наблюдения 55° . Графики азимутальных вариаций радиояркостной температуры наглядно демонстрируют известные явления:

- наличие сильной ветровой зависимости азимутальной анизотропии. При увеличении скорости ветра величина анизотропии возрастает;

- различный уровень приращения излучения при наблюдении по ветру (0°) и против (180°);
- одинаковый уровень приращения излучения при наблюдении в направлении поперечном ветру (90° и 270°).

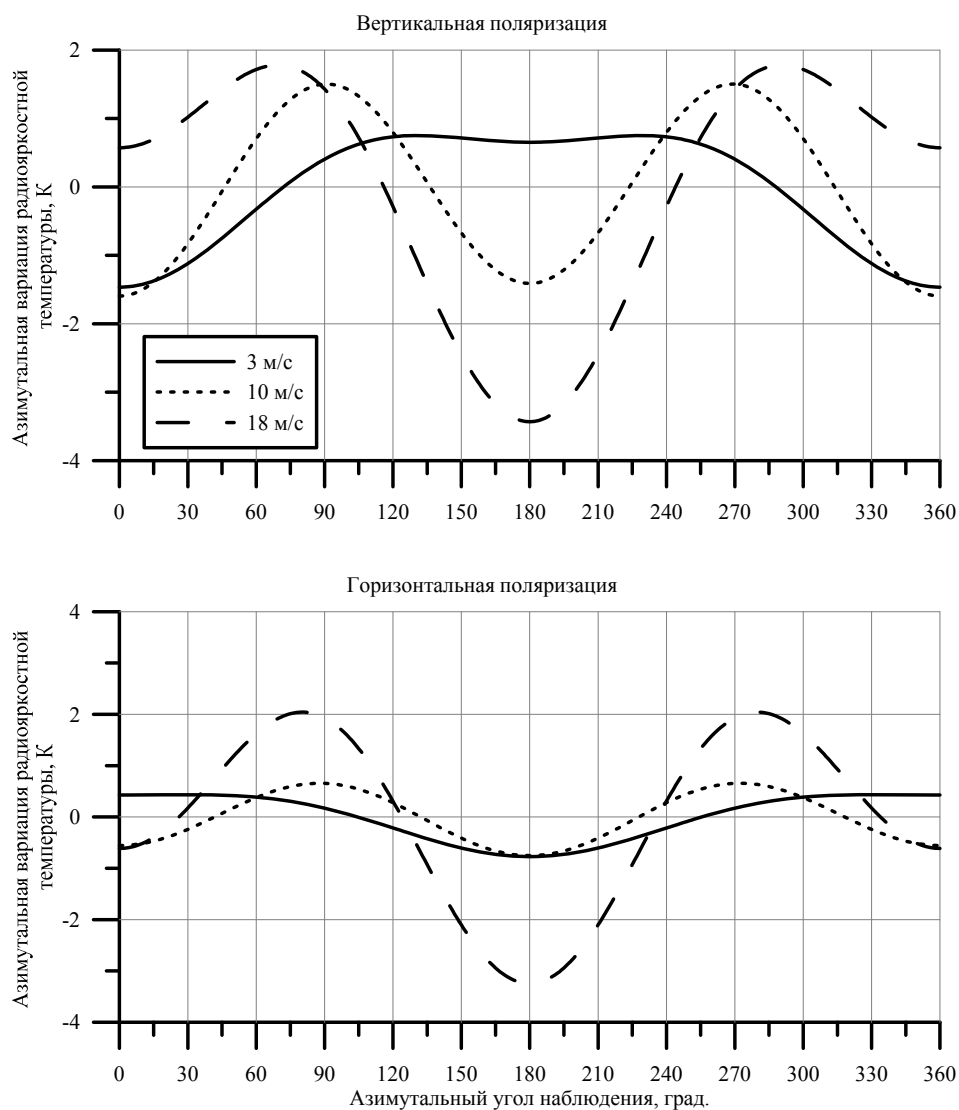


Рисунок 3.8 — Азимутальные вариации радиояркостной температуры взволнованной водной поверхности для вертикальной и горизонтальной поляризаций. Вертикальный угол наблюдения 55°

3.2.5. Корреляционное соответствие: модель - эксперимент

Для проверки точности аппроксимации азимутальной зависимости проведен корреляционный анализ между гармоническими коэффициентами анизотропии, полученными на основе экспериментальных данных и рассчитанными по модели **MiROSE-a**. На рисунке 3.9 представлены корреляционные зависимости для каждого гармонического коэффициента на вертикальных углах наблюдения $10, 25, 40, 55$ и 65° .

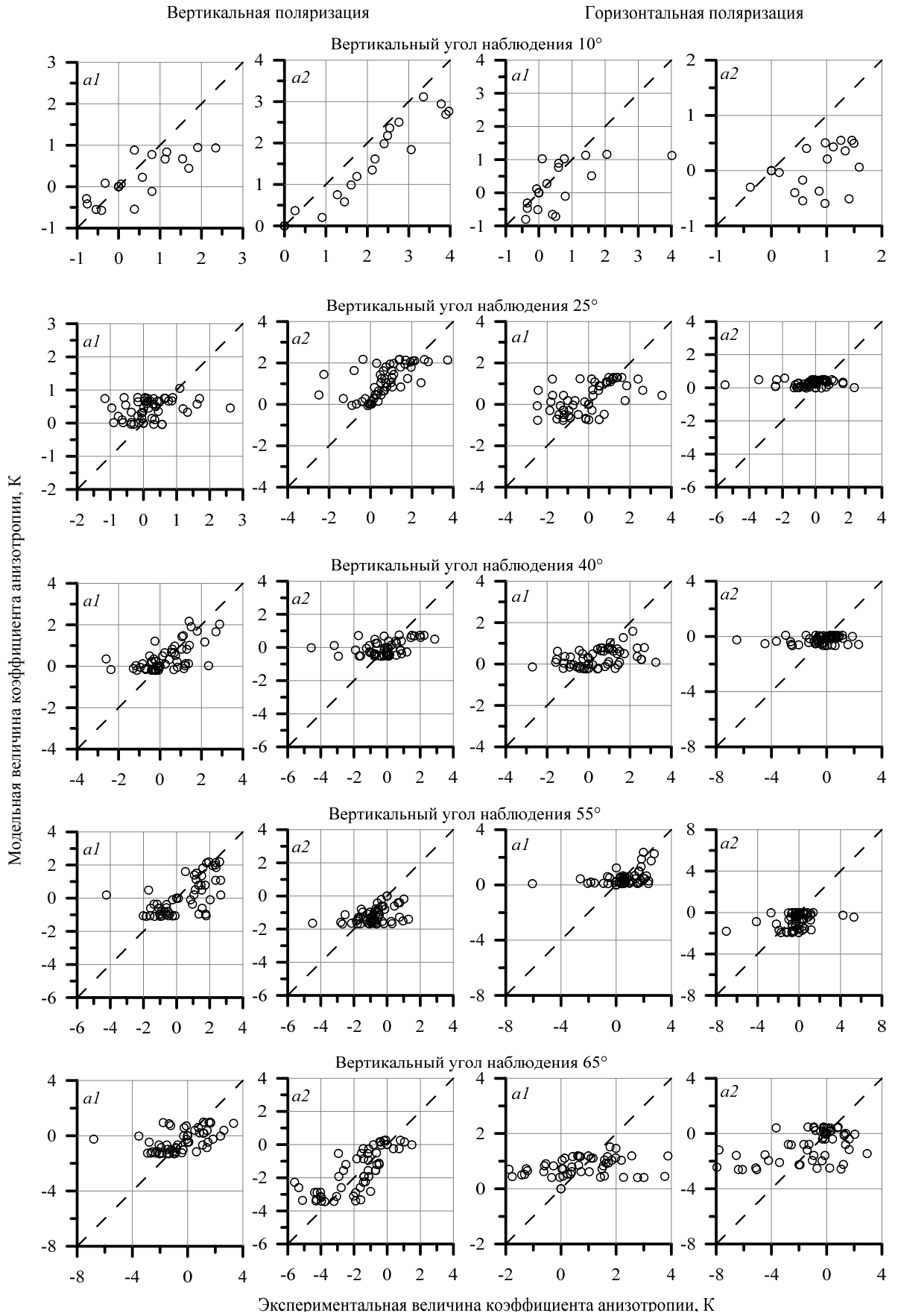


Рисунок 3.9 — Корреляционные зависимости гармонических коэффициентов азимутальной анизотропии. Сравнение модельного расчета с экспериментальными данными

В таблице 3.4 приведены значения коэффициентов корреляции r между экспериментально полученными и рассчитанными по модели **MiROSE-a** гармоническими коэффициентами азимутальной анизотропии. Значения приведены отдельно для каждого вертикального угла наблюдения и по всем данным.

Таблица 3.4 — Коэффициенты корреляции между гармоническими коэффициентами азимутальной анизотропии по модели и эксперименту

Гармонический коэффициент		Вертикальный угол наблюдения, град					По всем углам
		10	25	40	55	65	
V	a_1	0,7956	0,2856	0,6204	0,6465	0,4883	0,5865
	a_2	0,9524	0,596	0,3888	0,4068	0,7657	0,7891
H	a_1	0,6234	0,5441	0,4157	0,3975	0,2647	0,4455
	a_2	0,3944	0,1626	0,2425	0,318	0,4813	0,3735

Из рисунка 3.9 и таблицы 3.4 видно, что корреляция для коэффициента a_2 горизонтальной поляризации невелика (в общем составляет 0,37) как и в случае моделирования радиационно-ветровой зависимости. Для вертикальной поляризации корреляция достаточно высокая как для первого, так и для второго гармонического коэффициента азимутальной анизотропии. В главе 2 было показано, что количество записей азимутальной анизотропии мало и их недостаточно для расчета статистических оценок. Несмотря на недостаток статистики, в результате разработана модель, которая достоверно описывает результаты наблюдений и может применяться для предварительной оценки направления приводного ветра, информация о котором будет использоваться для решения других задач дистанционного зондирования.

3.3. Выводы по главе 3

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

- Разработанная 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), скорости ветра и физической температуры воды.

- Сравнение экспериментальных данных и регрессии, построенной на их основе, в рамках корреляционного анализа показало, что при моделировании радиационно-ветровой зависимости корреляция высокая и, следовательно, предлагаемая модель адекватно (на количественном уровне) описывает результаты наблюдений.
- Коэффициенты корреляции между моделью анизотропии и экспериментом недостаточно высоки, чтобы сказать адекватно или нет предлагаемая модель описывает результаты наблюдений. Это связано с недостатком экспериментальных данных. На качественном уровне модель анизотропии адекватно описывает результаты измерений и этого достаточно для экспресс оценки направления приводного ветра.
- Высокая степень корреляции между метеорологическими параметрами и интенсивностью радиоизлучения свидетельствует о наличии их сильной взаимосвязи, что дает возможность применять модельный расчет для восстановления вектора приводного ветра и температуры воды по угловым радиополяриметрическим измерениям.

ГЛАВА 4. Алгоритм определения направления ветра по спутниковым измерениям в КЭ «Конвергенция»

В предыдущих главах было показано, что микроволновое излучение водной поверхности очень чувствительно к изменению скорости и направлению ветра и другим параметрам. Было проведено моделирование, чтобы установить связь между некоторыми физическими параметрами среды океан-атмосферы и ее собственным излучением при известных углах наблюдения. На частоте порядка 37 ГГц есть сильная азимутальная зависимость радиояркой температуры на вертикальной и горизонтальной поляризациях, а также сильная зависимость третьего параметра Стокса. Наличие сильной зависимости радиоизлучения гравитационно-капиллярных волн от направления приводного ветра дает возможность использовать радиометрические измерения для определения как скорости, так и направления ветра.

В главе 3 была предложена модель **MiROSE-a**, с помощью которой можно рассчитать интенсивность радиоизлучения взволнованной водной поверхности на частоте 37,5 ГГц и учесть азимутальные эффекты. Однако, при интерпретации спутниковых данных анализируют излучение не на одной выделенной частоте, а одновременно на нескольких, поэтому применение предложенной модели пока ограничено. Вследствие этого для разработки и тестирования алгоритма определения направления ветра использована модель, описанная в работах [Meissner, Wentz, 2004, 2012; Wentz, Meissner, 2000] (далее модель **MW**). Данная модель получена на основе многолетнего анализа большого количества спутниковых и наземных радиометрических измерений системы океан-атмосфера.

4.1. Теоретическое обоснование возможности определения направления ветра

Как было показано в главе 1 азимутальная анизотропия описывается квазигармонической функцией, четной для вертикальной и горизонтальной поляризаций и нечетной для третьего S_3 и четвертого параметров Стокса. Установлено, что наибольшее влияние анизотропия излучения поверхности оказывает на S_3 . При этом величина анизотропного вклада зависит как от частоты излучения f , так и от модуля скорости ветра U_{10} .

В предлагаемом алгоритме определения направления ветра предполагается, что известны все необходимые геофизические параметры системы океан-атмосфера, кроме

направления ветра α_v . Следовательно, известна модельная зависимость третьего параметра Стокса $S3(f, T_B, S, U_{10}, \theta, \varphi, V, L, R)$ от частоты излучения f , температуры воды T_B , солёности S , скорости ветра U_{10} , угла встречи с землей θ , азимутального угла φ и поглощения в атмосфере, которое в модели [Meissner, Wentz, 2012] определяется через интегральное паросодержание V , содержание капельной влаги L и интенсивности осадков R . Так как далее рассматривается азимутальная зависимость, то запись $S3(f, T_B, S, U_{10}, \theta, \varphi, V, L, R)$ сократим для удобства до $S3(\varphi, \dots)$. На рисунке 4.1 представлена типичная форма зависимости $S3(\varphi, \dots)$ для частоты $f = 36,5$ ГГц.

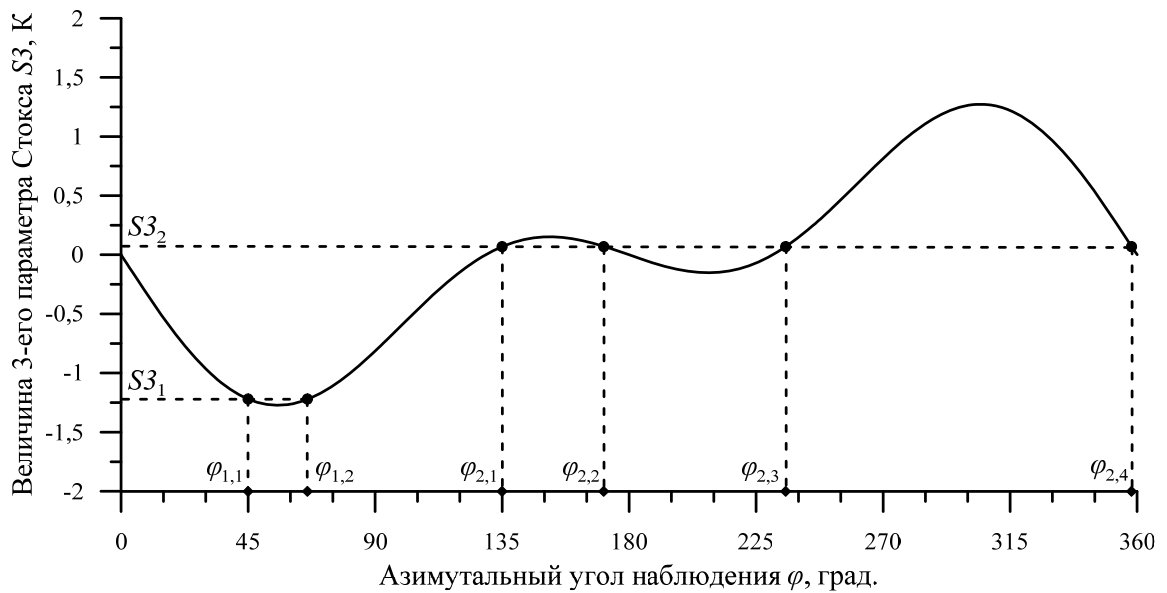


Рисунок 4.1 — Зависимость третьего параметра Стокса $S3(\varphi, \dots)$ от относительного азимута ветра. При двух различных азимутах зондирования одного и того же элемента поверхности регистрируют два значения $S3_1, S3_2$, по которым определяют наборы возможных направлений ветра

В КЭ «Конвергенция» планируется проводить измерения, как в передней части конуса измерений, так и в его задней части. На рисунке 4.2 приводится геометрия зондирования при движении спутника вдоль трека. Из рисунка следует, что если первоначальное направление зондирования вперёд по треку составляет угол φ_{31} , то при зондировании назад по треку тот же элемент разрешения будет измерен под углом φ_{32} , который связан с φ_{31} соотношением: $\varphi_{32} = \pi - \varphi_{31}$. Различие между направлениями зондирования составит: $\Delta\varphi = \varphi_{32} - \varphi_{31} = \pi - 2\varphi_{31}$. Очевидно, что один и тот же элемент разрешения на поверхности попадает в задний сектор наблюдения после того как спутник продвинется по треку на расстояние $L(\varphi_{31}) = 2R \cdot \cos(\varphi_{31})$, где R — радиус конуса сканирования на поверхности Земли. Это смещение происходит с задержкой по времени $\Delta t = L/V$, где V — скорость полёта спутника.

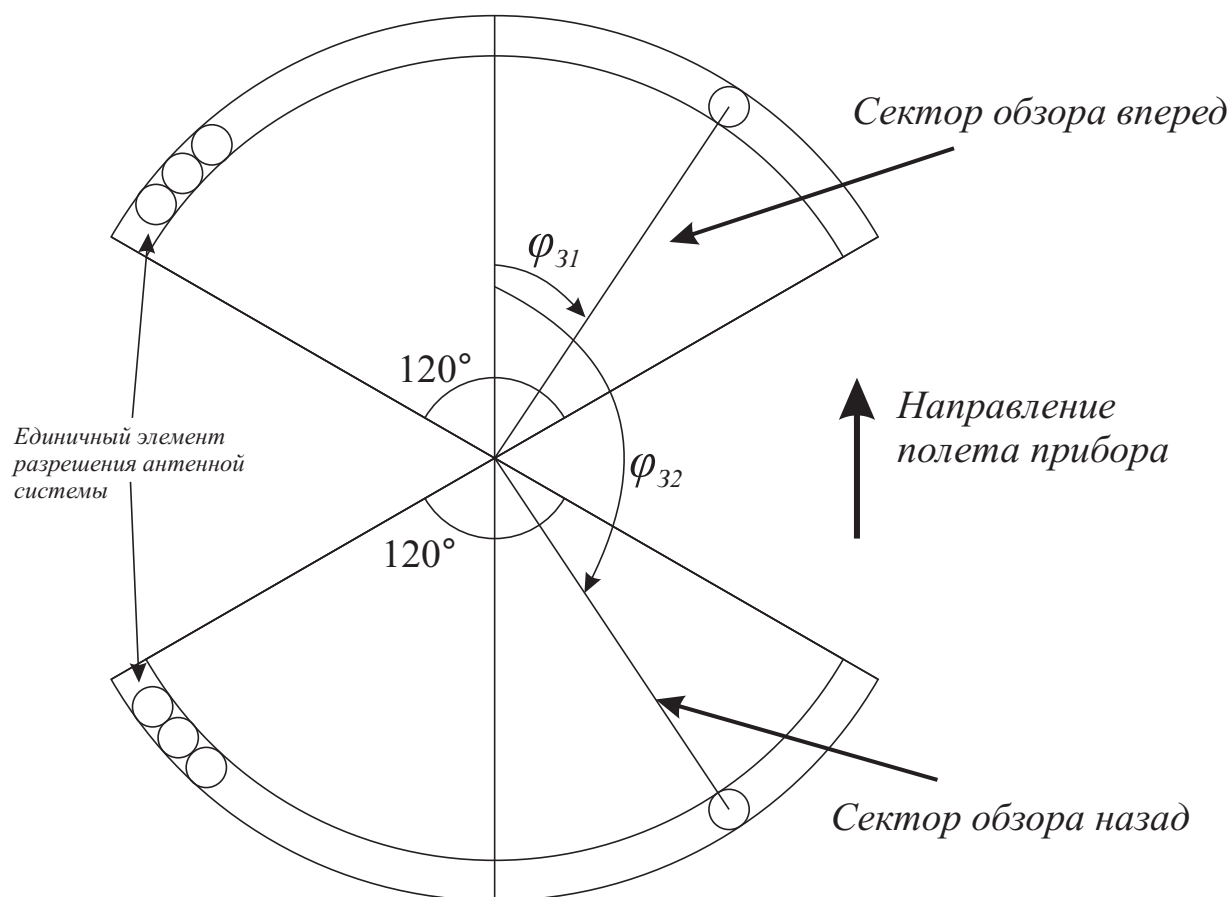


Рисунок 4.2 — Геометрия зондирования одних и тех же элементов поверхности при движении спутника вдоль трека

Таким образом, при измерении одного и того же элемента подстилающей поверхности будет происходить при двух значениях φ_{31} и φ_{32} . В результате при решении обратной задачи мы получим два значения третьего параметра Стокса $S3_1$ и $S3_2$, и значения азимутальных углов визирования φ_{31} и φ_{32} .

Вернемся к рисунку 4.1. Видно, что при любом измеренном значении $S3_1$ относительный азимут ветра φ имеет неоднозначное значение. Значению $S3_1$ удовлетворяет два значения угла $\varphi_{1,1}$ и $\varphi_{1,2}$, а при значении $S3_2$ уже четыре возможных значения — $\varphi_{2,1}$, $\varphi_{2,2}$, $\varphi_{2,3}$ и $\varphi_{2,4}$. Какое из значений φ соответствует истинному направлению ветра по одному измерению определить невозможно. Такая возможность появляется, если один и тот же элемент разрешения на поверхности измеряется под различными ракурсами.

Пусть есть два измерения третьего параметра Стокса $S3_1$ и $S3_2$ с одной площадки, соответственно в передней и задней полосе обзора. Тогда восстановление направления ветра по двум измерениям третьего параметра Стокса производится в следующем порядке:

- На основе известной зависимости $S3(\varphi, \dots)$ третьего параметра Стокса от относительного направления ветра по известному значению $S3_1$ и $S3_2$ определить два вектора возможных значений $\overline{\varphi}_1 = \{\varphi_{1,1}, \varphi_{1,2}, \varphi_{1,3}, \varphi_{1,4}\}$ и $\overline{\varphi}_2 = \{\varphi_{2,1}, \varphi_{2,2}, \varphi_{2,3}, \varphi_{2,4}\}$. (Максимальная размерность этого вектора не превышает четырех элементов. В нашем примере на рисунке 4.1 число элементов в векторе $\overline{\varphi}_1$ равно двум.) Если бы измерения $S3_1$ проводились с абсолютно точно, а модель зависимости $S3(\varphi, \dots)$ точно описывала бы процесс рассеяния, то можно было бы сказать, что относительное направление ветра равно либо $\varphi_{1,1}$, либо $\varphi_{1,2}$.
- Из углов зондирования φ_{31} и φ_{32} вычесть соответствующие им вектора $\overline{\varphi}_1$ и $\overline{\varphi}_2$ и получить вектора $\overline{\varphi}'_1 = \{\varphi'_{1,1}, \varphi'_{1,2}, \varphi'_{1,3}, \varphi'_{1,4}\}$ и $\overline{\varphi}'_2 = \{\varphi'_{2,1}, \varphi'_{2,2}, \varphi'_{2,3}, \varphi'_{2,4}\}$.
- Рассчитать возможные комбинации разности между элементами векторов $\overline{\varphi}'_1$ и $\overline{\varphi}'_2$. Их максимальное число не превышает $4 \times 4 = 16$ значений.

$$\begin{vmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ & & \dots & \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} \end{vmatrix}, \text{ где } d_{i,j} = \varphi'_{1i} - \varphi'_{2j}.$$

При точных измерениях и правильной модели одна из разностей должна стать нулевой. При наличии погрешностей и неточности модели истинное значение направления ветра следует вычислять на основе $d_{i,j}$, которое имеет минимальное значение.

- Определить элемент $d_{i,j}$, который имеет минимальное значение модуля $|d_{i,j}|_{\min}$. По номеру i или j определить φ'_{1i} или φ'_{2j} , которые и будут направлением ветра, так как угол азимутальной анизотропии $\varphi_{\text{АН}}$ равен разнице между направлением зондирования φ_3 и направлением ветра $\alpha_{\text{в}}$: $\varphi_{\text{АН}} = \varphi_3 - \alpha_{\text{в}}$.

4.2. Повышение надёжности измерений за счёт использования различных частотных каналов

В многоканальном радиометре (МИРС) для измерения направления ветра предполагается использовать не один канал, а несколько (каналы с частотами 10,65; 18,7 и 36,5 ГГц). Это повышает надёжность измерений. Предлагается проводить объединение результатов, получаемых в каждом канале, с учетом погрешностей измерений и

погрешностей косвенных вычислений. При этом естественно предположить, что распределение по третьему параметру Стокса является нормальным, а ширина этого распределения соответствует погрешностям его измерения.

Работа алгоритма определения направления ветра основана на знании геофизических параметров системы океан-атмосфера и телеметрии спутника. Набор необходимых для моделирования геофизических параметров был указан в п. 4.2. К телеметрии относятся значения: угол встречи с землей θ , направления сканирования φ'_{31} и φ'_{32} , направление полета спутника φ_{Π} в момент времени, соответствующий измерениям на углах φ'_{31} и φ'_{32} , отсчитанное от севера. Направление зондирования принято отсчитывать от направления на север, поэтому $\varphi_{31} = \varphi'_{31} + \varphi_{\Pi}$, аналогично для угла φ_{32} . Знание этих параметров необходимо для моделирования угловой зависимости (теоретической) третьего параметра Стокса ($S3$).

При полете сканирующей системы есть измерения одной площадки поверхности под углами φ_{31} и φ_{32} (см. рисунок 4.2). Необходимо найти азимутальные углы φ_1 и φ_2 (п. 4.1), при которых экспериментально измеренные значения $S3_1$ и $S3_2$ (при φ_{31} и φ_{32}) соответствуют модельным $S3(\varphi_1, \dots)$ и $S3(\varphi_2, \dots)$. На основе найденных углов φ_1 и φ_2 определить направление ветра по соотношениям $\alpha_v = \varphi_{31} - \varphi_1 = \varphi_{32} - \varphi_2$.

Равенство $\alpha_v = \varphi_{31} - \varphi_1 = \varphi_{32} - \varphi_2$ выполняется только при модельном расчете без погрешностей. В реальных радиометрических системах всегда присутствует случайная шумовая составляющая, которая определяет предельную чувствительность радиометра δ и следовательно $\alpha_v \neq \varphi_{31} - \varphi_1 \neq \varphi_{32} - \varphi_2$. Поэтому предлагается ввести вероятности P_1 и P_2 нахождения измерений $S3_1$ и $S3_2$ в окрестности азимутальных углов φ_1 и φ_2 . Восстановление направления ветра по многочастотным измерениям третьего параметра Стокса производится в следующем порядке:

- Для известных (заранее определенных) геофизических параметров системы океан-атмосфера и телеметрии спутника выполнить расчет теоретической угловой зависимости третьего параметра Стокса $S3(\varphi, \dots)$ (см. рисунок 4.1):

$$S3(\varphi, \dots) = T_{\mathcal{Y}}^{+45}(\varphi, \dots) - T_{\mathcal{Y}}^{-45}(\varphi, \dots),$$
где $T_{\mathcal{Y}}^{\pm 45}(\varphi, \dots)$ — радиояркая температура на линейных $\pm 45^\circ$ поляризациях.
- Задать функцию распределения вероятности $P_1(s, \mu_1, \sigma)$ и $P_2(s, \mu_2, \sigma)$ для первого и второго измерения. Функция вероятности P соответствует нормальному распределению, в котором $\sigma = \delta_{S3} = \sqrt{2} \cdot \delta_p$, где δ_p — чувствительность радиометра по поляризации, $\mu_1 = S3_1$ и $\mu_2 = S3_2$, s — величина третьего параметра Стокса.

- Определить функции вероятностей $P_1(\varphi)$ и $P_2(\varphi)$ т.е. вероятностей с которыми измерения $S3_1$ и $S3_2$ с учетом чувствительности радиометра могут быть выполнены на углах φ . Вероятность рассчитывается для дискретных значений углов φ_j , при $j = 1 \dots 360$: $P_i(\varphi_j) = P_i(S3(\varphi_j, \dots), \mu_i, \sigma)$, где $i = 1, 2$. (рисунок 4.3).

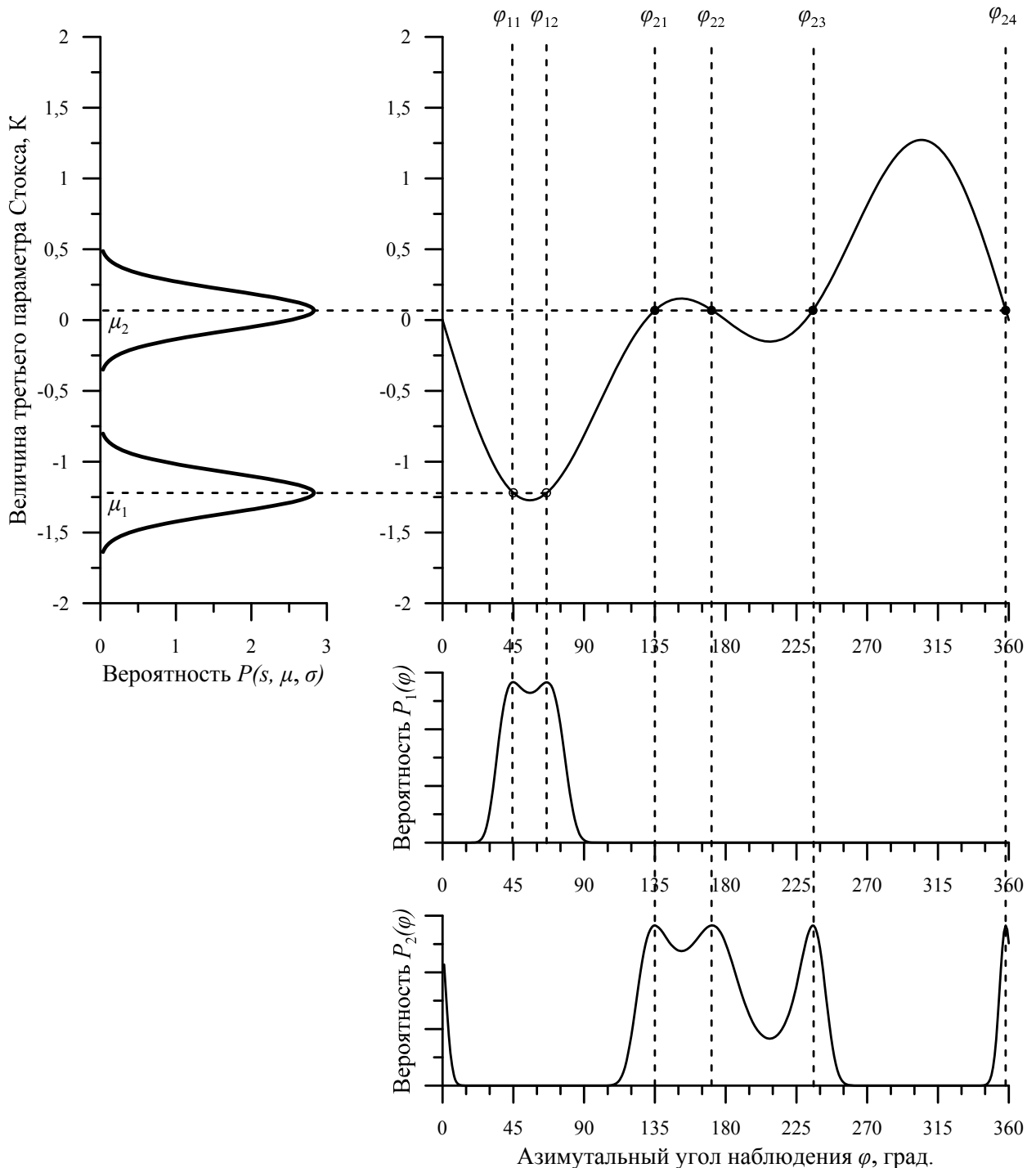


Рисунок 4.3. Определение функций вероятностей $P_1(\varphi)$ и $P_2(\varphi)$, с которыми измерения $S3_1$ и $S3_2$ могут быть выполнены на углах φ . Чтобы рисунок был наглядным $\sigma = 0,1$ (реальная чувствительность составляет $0,315 \cdot \sqrt{2}$ для частоты 36,5 ГГц)

- Выполнить нормировку вероятностей $P_1(\varphi)$ и $P_2(\varphi)$: $P_N(\varphi) = \frac{P(\varphi)}{\sum_j P(\varphi_j)}$. Далее все вероятности использовать нормированными.
- Совместить графики для вероятностей $P_1(\varphi)$ и $P_2(\varphi)$, используя понятие азимутальной анизотропии, и получить зависимости $P_1(\varphi_{31} - \varphi)$ и $P_2(\varphi_{32} - \varphi)$ (рисунок 4.4).
- Найти общую вероятность $P_0(\varphi) = P_1(\varphi_{31} - \varphi) \cdot P_2(\varphi_{32} - \varphi)$ и по максимальному значению определить направление ветра $\alpha_{\text{в}} = \varphi = \max(P_0(\varphi))$.

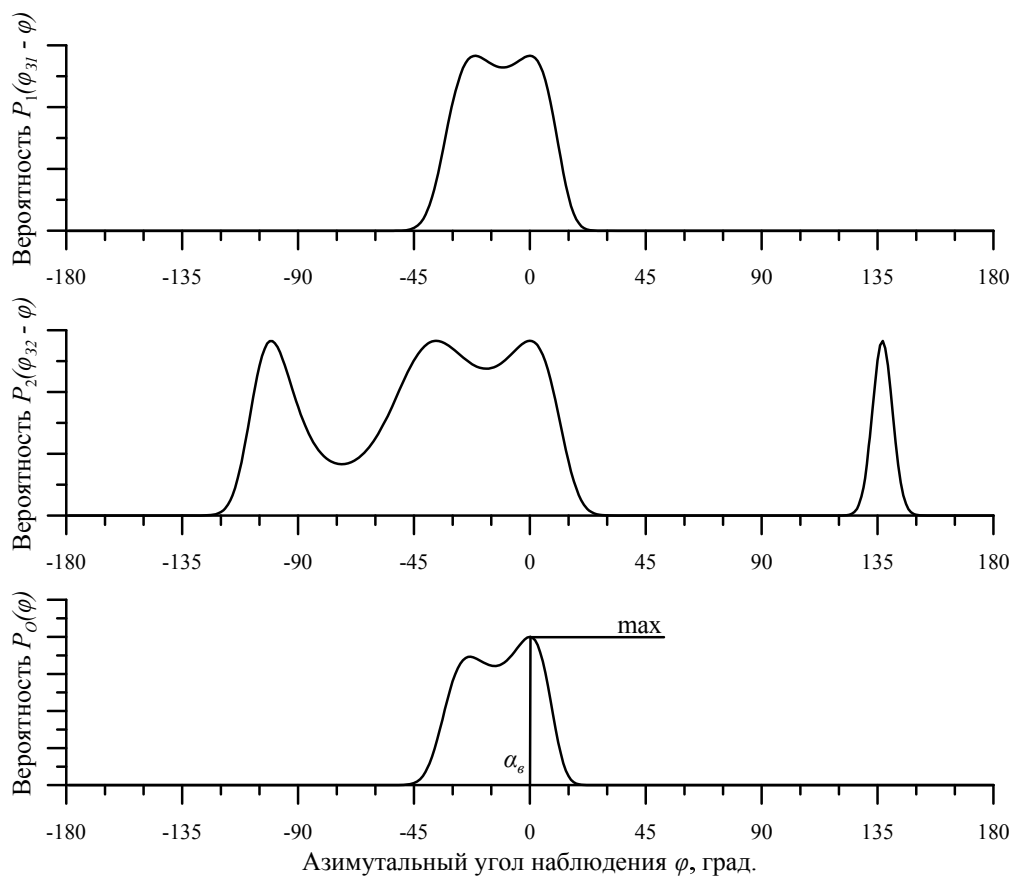


Рисунок 4.4 — Совмещенные графики вероятностей $P_1(\varphi_{31} - \varphi)$ и $P_2(\varphi_{32} - \varphi)$ и общая вероятность $P_0(\varphi)$. Определение направления ветра $\alpha_{\text{в}} = \max(P_0(\varphi)) = 0^\circ$

4.3. Решение тестовой задачи определения направления ветра

С целью проверки работоспособности предлагаемого алгоритма необходимо провести моделирование радиояркой температуры, которая может быть измерена приборами со спутника, учесть ошибки измерений, моделирования и решить обратную задачу восстановления направления ветра.

Создание тестового поля

Принцип работы алгоритма определения направления ветра будет показан на примере решения тестовой задачи. Для этого создано непрерывное поле скорости и направления ветра, показанное на рисунке 4.5 (условно 1000×1000 км). На данном поле ветер представляет собой вихрь с большой скоростью по краям и нулевой скоростью в середине.

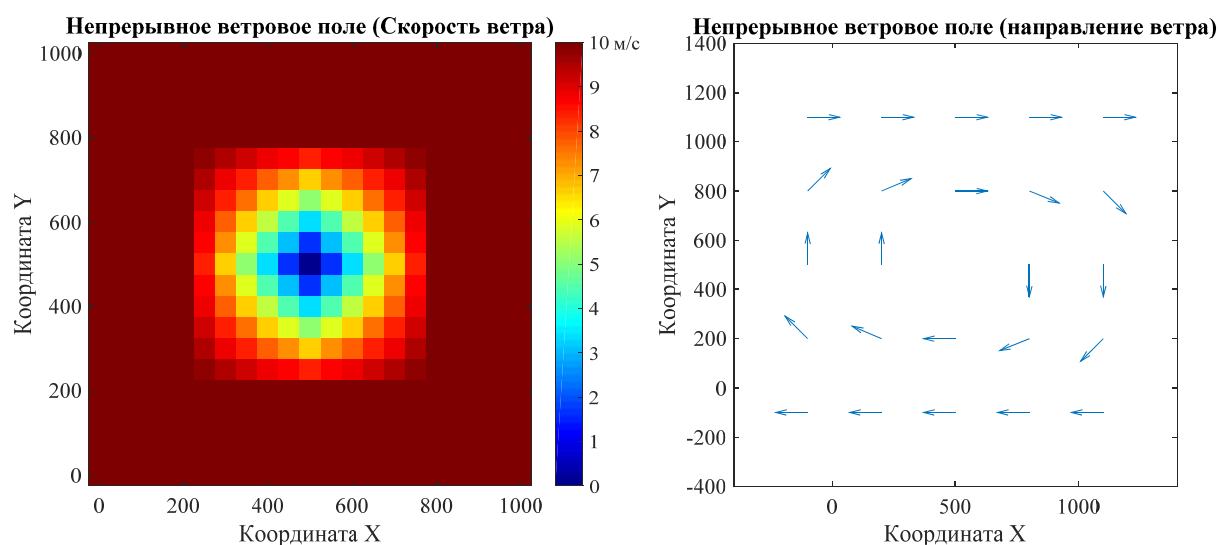


Рисунок 4.5 — Непрерывное поле ветра размером 1000×1000 км

В процессе полета радиометр сканирует по конусу, как было показано ранее, в двух полосах обзора по 120° каждая (см. рисунок 4.2). В передней (прямой) полосе азимутальный угол сканирования находится в диапазоне от -60 до 60°, отсчитанных от направления полета. В обратной полосе угол сканирования находится в диапазоне от 120 до 240°. Схематично полет прибора над тестовым полем, прямые и обратные полосы сканирования показаны на рисунке 4.6.

Так как сканирование проводится и в прямом, и в обратном направлении, то каждый элемент тестового поля, попавший в полосу обзора, будет наблюдаться два раза с небольшой временной задержкой. Данную задержку по времени можно легко вычислить на основе параметров орбиты спутника и геометрии сканирования.

Очевидно, что при реальных измерениях со спутника приходится совмещать измерения некоторой площадки на поверхности, полученные при прямом и обратном сканировании. Конечно, координаты центра данной площадки будут близки, но как

показывают реальные данные, полученные прибором WindSat, часто немного (в пределах $0,125^\circ$) не совпадают.

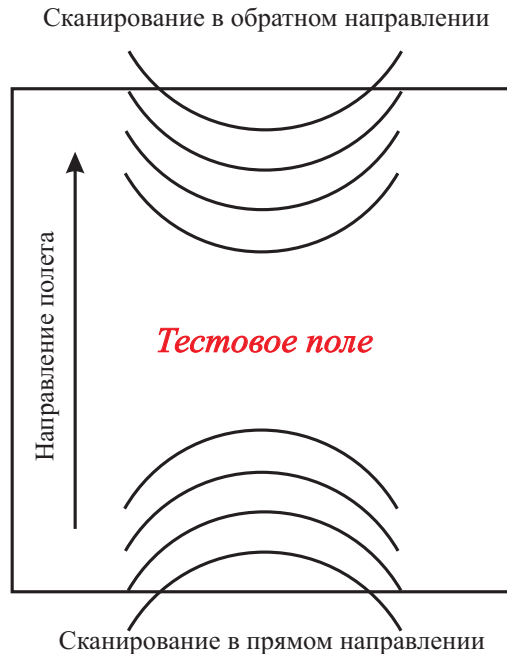


Рисунок 4.6 — Геометрия сканирования над тестовым полем

В данной тестовой задаче можно избежать представленных сложностей следующим образом: при расчете радиояркостной температуры для прямого направления зондирования сразу рассчитать радиояркостную температуру и для соответствующего обратного направления. Так, например, при зондировании в прямом направлении при угле ϕ_{31} вычислены радиояркостные температуры $T_1^{+45^\circ}(\phi_{31})$ и $T_1^{-45^\circ}(\phi_{31})$, то для обратного направления $\phi_{32} = \pi - \phi_{31}$ будут вычислены температуры $T_2^{+45^\circ}(\phi_{32})$ и $T_2^{-45^\circ}(\phi_{32})$. С помощью этой операции все рассчитанные значения в прямом и обратном направлении будут получены с соответствующих им площадок, которые имеют идеальное пространственное совмещение.

Пространственное разрешение на поверхности земли реальных спутниковых радиометров различается с частотой наблюдения. Так, для «низкой» частоты, например 19,35 ГГц, разрешение на поверхности для прибора SSM/I составляет — 69×43 км, в то время как на частоте 85,5 ГГц — 15×13 км. В тестовой задаче примем пространственное разрешение на разных частотах одинаковым, и представляющим собой круг с диаметром 10 км.

Метод сканирования тестового поля примем аналогичным коническому сканированию. Исключим из данной задачи время, оно здесь не столь важно. Шаг по азимутальному углу выберем равным, для простоты, 1° . Будем считать, что за один оборот

по конусу сканирования положение спутника не меняется (спутник застыл над полем и проводит сканирование). После выполнения данного цикла сканирования спутник переместился на 10 км и снова застыл для измерений. В результате получим массив измерений для прямых и обратных сканирований, в которых строки соответствуют номеру цикла сканирования, а столбцы — номеру угла в цикле сканирования. Пример такого массива в виде цветовой карты показан на рисунке 4.7.

Как видно на рисунке 4.7, массив, построенный в виде карты, искривлен. Это связано с коническим сканированием и ограниченным размером тестового поля. Для удобства отображения информации далее все цветовые карты будут построены в координатах тестового поля аналогично рисунку 4.5.

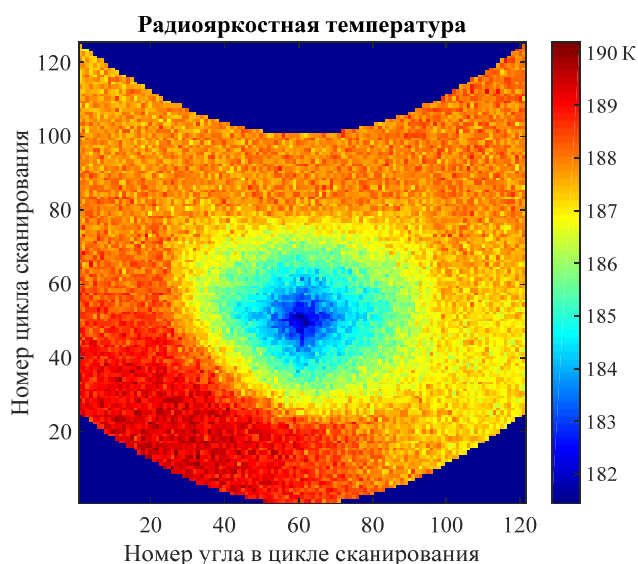


Рисунок 4.7 — Массив измерений радиояркостной температуры на линейной поляризации $+45^\circ$ при прямом сканировании на частоте 36,5 ГГц

Прямое моделирование. Расчет радиояркостной температуры

Решение прямой задачи основано на вычислении радиояркостной температуры, которая может быть измерена со спутника при заданных геофизических параметрах системы океан-атмосфера и параметрах сканирования. Расчет радиояркостной температуры на линейных $\pm 45^\circ$ поляризациях производится в соответствии с моделью MW.

В данной модели для расчета радиояркостной температуры необходимы значения температуры воды $T_B = 300$ К ($26,85^\circ\text{C}$); солёности $S = 35$ ‰; интегрального паросодержания $V = 41$ мм; водозапаса облаков $L = 0$ мм, интенсивности осадков $R = 0$ мм, частоты $f = 10,65$; $18,7$ и $36,5$ ГГц, угла встречи с землей $\theta = 53,1^\circ$, азимутального угла зондирования φ ($-60 \dots +60^\circ$ для прямого сканирования и $120-240^\circ$ для обратного),

скорости ветра U_{10} и направления ветра φ_v (заданы полем на рисунке 4.5). На рисунке 4.8 представлена рассчитанная в соответствии с данной моделью радиояркостная температура на линейных $\pm 45^\circ$ поляризациях для частоты 36,5 ГГц и значении третьего параметра Стокса, который вычисляется как $S3 = T_{Я}^{+45^\circ} - T_{Я}^{-45^\circ}$.

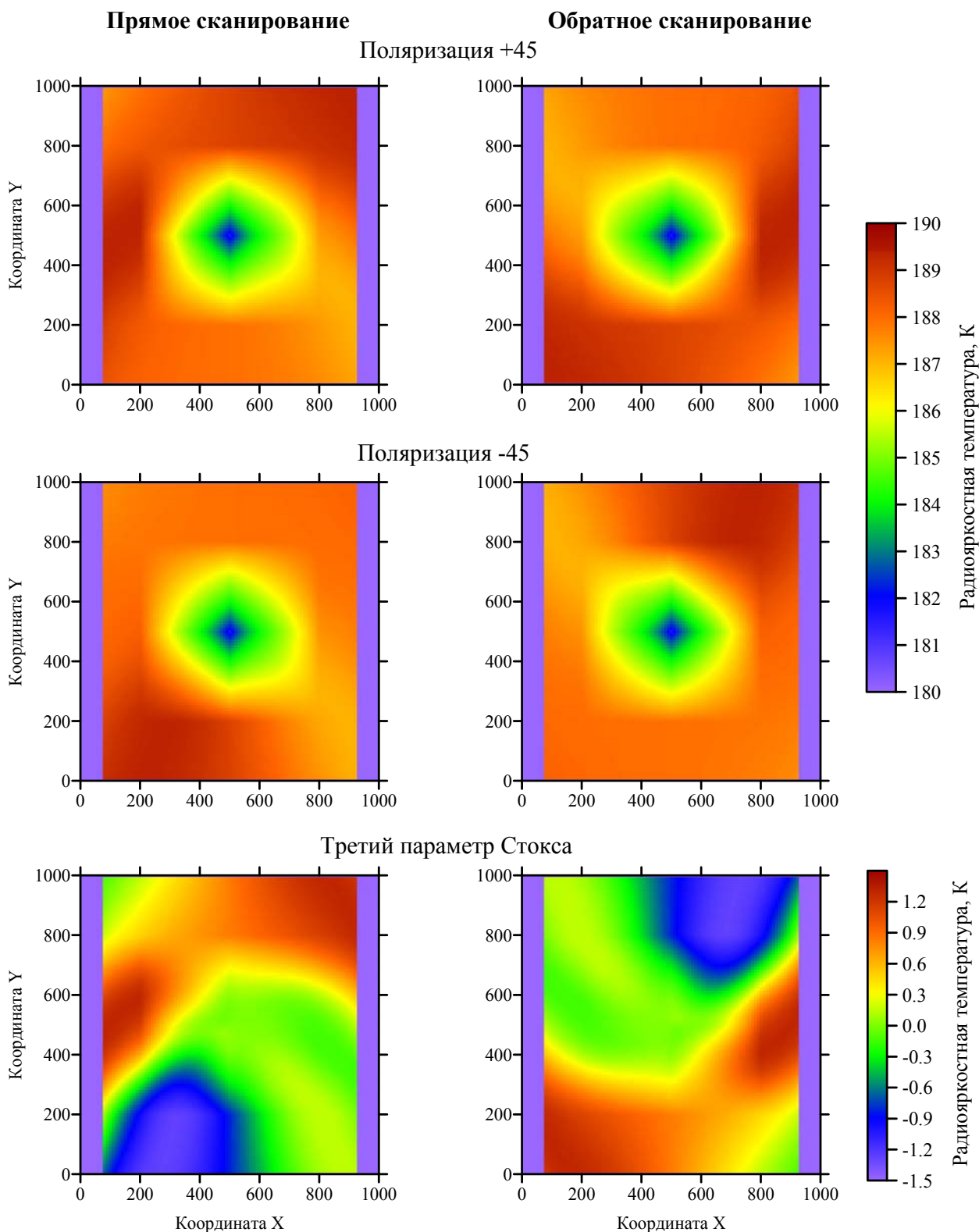


Рисунок 4.8 — Рассчитанное излучение ветрового поля для линейных $\pm 45^\circ$ поляризаций и третьего параметра Стокса на частоте 36,5 ГГц

По представленным картам видно, что при небольших скоростях ветра (в центре каждого изображения) изменения радиояростной температуры невелики. Однако, при удалении от центра вихря, где скорость ветра большая (10 м/с) прослеживается четкое изменение радиояростной температуры, связанное с азимутальной анизотропией радиоизлучения. Соответственно происходит резкое изменение величины третьего параметра Стокса и амплитуда изменения достигает (на 36,5 ГГц при 10 м/с) для противоположных направлений ветра 3 К. На других частотах вариации в радиояростной температуре и третьем параметре Стокса будут аналогичными с небольшими отличиями по амплитуде, с уменьшением частоты амплитуда азимутальных вариаций уменьшается.

Решение обратной задачи в случае отсутствия ошибок

Используя алгоритм, описанный в п. 4.2, проведено восстановление направления ветра по модельным расчетам без внесения ошибок, связанных как с измерениями, так и с моделированием. Направление ветра определяется по максимуму произведения вероятностей среди результатов, полученных для каждой из трех частот. Результат представлен на рисунке 4.9.

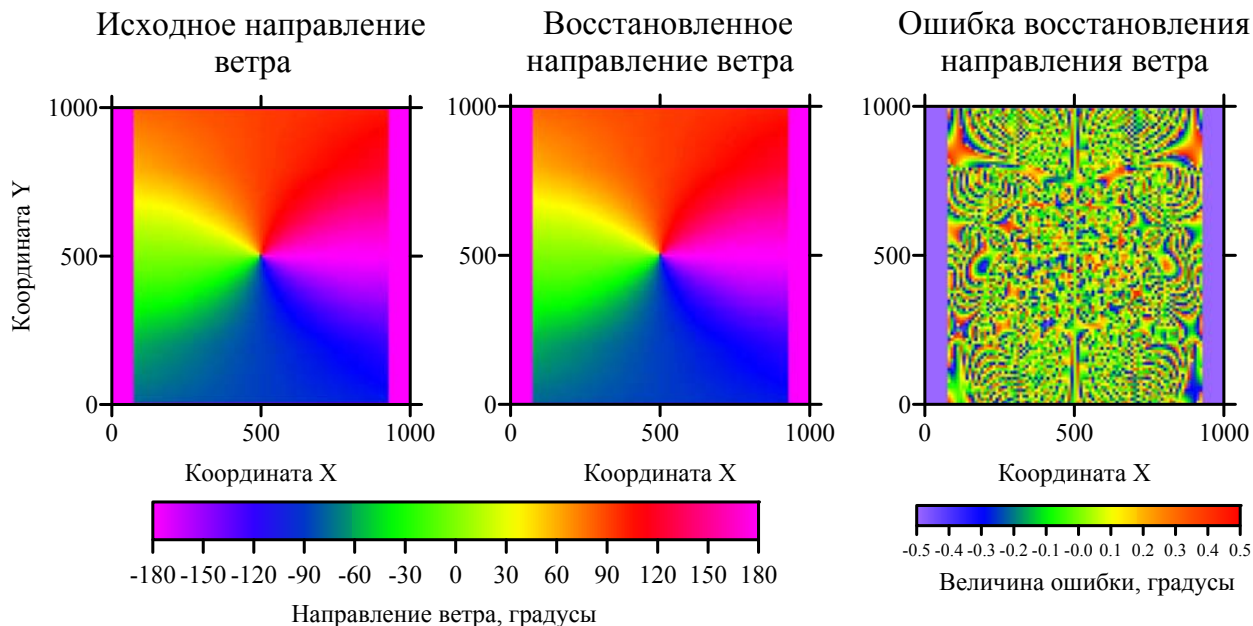


Рисунок 4.9 — Результат восстановления направления ветра по измерениям на частотах 10,65; 18,7 и 36,5 ГГц для моделирования без ошибок

Из представленных графиков очевидно, что при отсутствии ошибок направление ветра восстанавливается точно. Ошибка определения направления (рисунок 4.9, справа) связана с тем, что при решении задачи проверяются дискретные значения направлений

ветра (1, 2, ..., 360°), поэтому и точность соответствует половине цены деления, что и наблюдается на графике.

Восстановление направления ветра при учете чувствительности измерительных приборов

В предыдущем разделе было показано, что при идеальном моделировании восстановление направления ветра производится с высокой точностью. Однако, в реальных условиях всегда присутствуют погрешности, как измерительного оборудования, так и моделирования. К погрешностям измерительного оборудования относятся ошибки калибровки, чувствительность радиометров и систематические ошибки измерений. К ошибкам моделирования относятся неточности определения геофизических параметров системы океан-атмосфера по спутниковым данным и неточности используемой модели.

Проведение полного анализа всех возможных погрешностей достаточно трудоемкий процесс моделирования и требует некоторого времени, но прежде всего он требует знания погрешностей определения геофизических параметров (например: скорости ветра, температуры воды и т.д.). Эти погрешности невозможно оценить без привязки предлагаемого алгоритма к конкретной измерительной системе (SSM/I, SSMI/S, WindSat, МИРС).

Предлагаемый метод восстановления направления ветра предложен специально для обработки измерений прибором МИРС. К настоящему моменту известны только чувствительности радиометрических приборов, поэтому первый вариант оценки погрешностей восстановления направления ветра будет связан именно с чувствительностью радиометрических приемников. Со временем будут предложены алгоритмы для определения параметров океана и атмосферы и уже тогда станет возможным провести моделирование с учетом погрешностей определения геофизических параметров.

Чувствительность радиометров прибора МИРС по поляризациям составляет 0,315; 0,495 и 0,375 К для частот 36,5; 18,7 и 10,65 ГГц. Известно, что собственные шумы радиометра распределены по нормальному закону, тогда измеренная радиояркостьная температура будет определяться как: $T_{\text{я}}^{\text{изм}} = T_{\text{я}}^{\text{мод}} + T_{\text{я}}^{\text{шум}}$, где $T_{\text{я}}^{\text{мод}}$ — модельное значение радиояркостьной температуры; $T_{\text{я}}^{\text{шум}}$ — шум прибора с плотностью вероятности $P(T, \mu, \sigma)$, в которой μ — математическое ожидание, равное 0, σ — среднеквадратическое отклонение, равное чувствительности радиометра; T — температура. Таким образом, добавление ошибок к модельной величине измеренной радиояркостьной температуре на

линейных $\pm 45^\circ$ поляризациях производится путем генерации выборки температуры $T_{\text{я}}^{\text{шум}}$ с заданным законом распределения. На рисунке 4.10 представлена карта рассчитанной радиояростной температуры третьего параметра Стокса для частоты 36,5 ГГц с шумом.

По сравнению с картой, показанной на рисунке 4.8 (слева, внизу) здесь видно сильный шум, вызванный радиометром. Такая картина при измерении со спутника получиться не может. Это связано с тем, что при спутниковых наблюдениях сканирование поверхности происходит достаточно быстро и соседние области, с которых получены измерения, усредняются, что приводит к сглаживанию поля радиояростной температуры. Также при усреднении погрешность, связанная с чувствительностью прибора уменьшается. Для примера на рисунке 4.11 представлены измерения третьего параметра Стокса с помощью прибора WindSat, нанесенные на регулярную сетку в $0,25^\circ$.

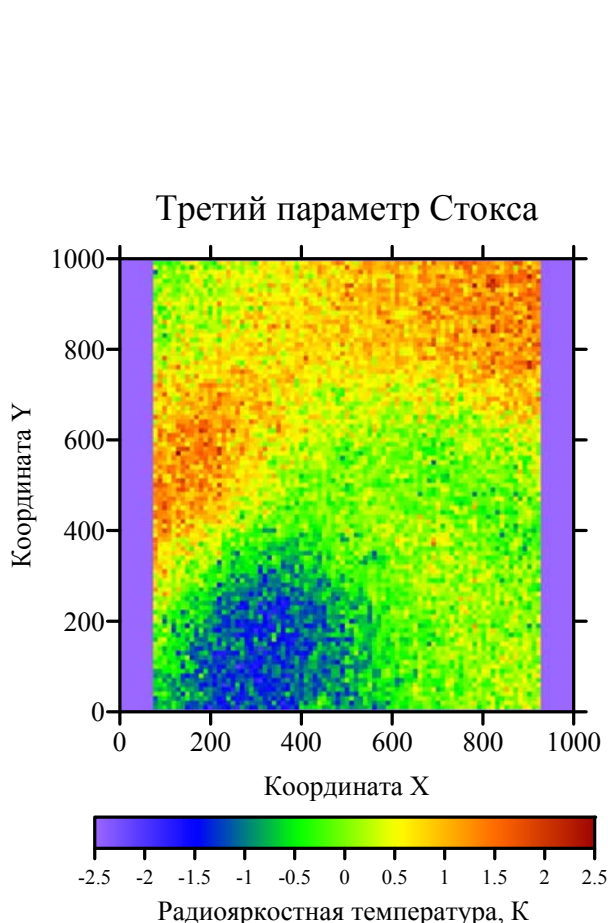


Рисунок 4.10 — Радиояростная температура третьего параметра Стокса (36,5 ГГц) с ошибками по чувствительности

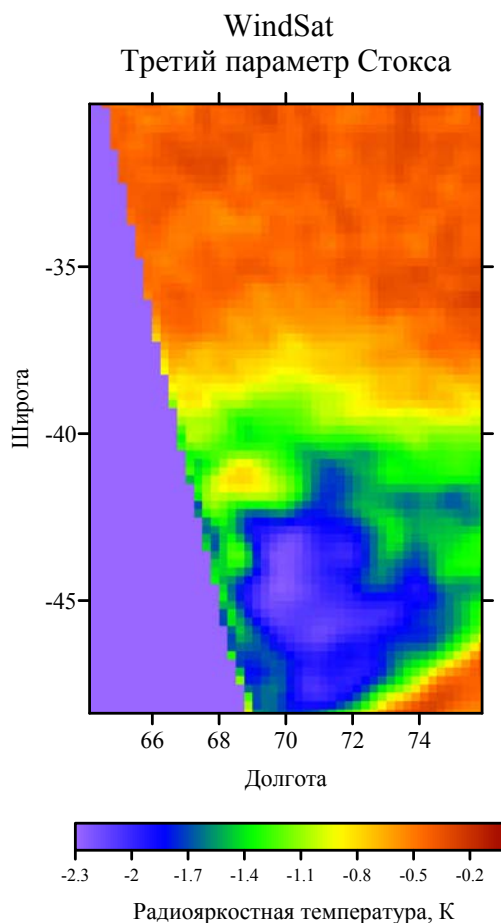


Рисунок 4.11 — Радиояростная температура третьего параметра Стокса (37 ГГц) по данным прибора WindSat за 27 апреля 2007 г. Передняя полоса обзора

На рисунке 4.11 видно, что полученные радиояркостные температуры сглажены в пространстве в отличие от результата моделирования на рисунке 4.10. Таким образом, для того, чтобы сделать результат моделирования похожим на реальные измерения, было проведено простое усреднение по областям 3×3 элемента. Результирующие значения радиояркостных температур для третьего параметра Стокса на трех частотах при прямом и обратном направлениях наблюдения приведены на рисунке 4.12.

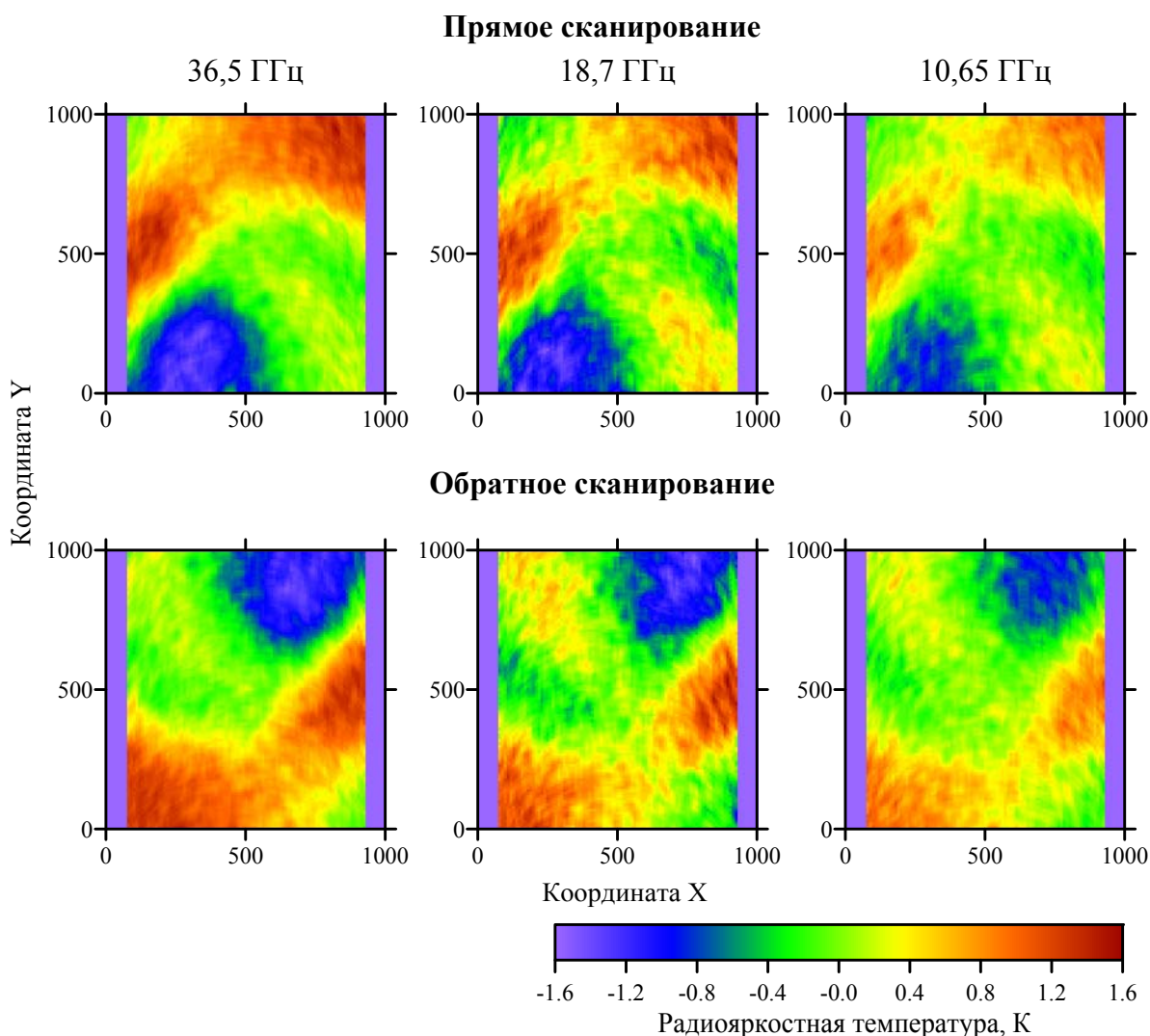


Рисунок 4.12 — Усредненные значения третьего параметра Стокса при моделировании с ошибками

В результате восстановления направления ветра были получены результаты, представленные на рисунке 4.13. На данном рисунке приведено восстановленное направление ветра и погрешность определенного направления. Следует отметить, что в области (вне белого круга), где скорость ветра более 3 м/с, отчетливо видна корреляция с исходным направлением (рисунок 4.9, слева).

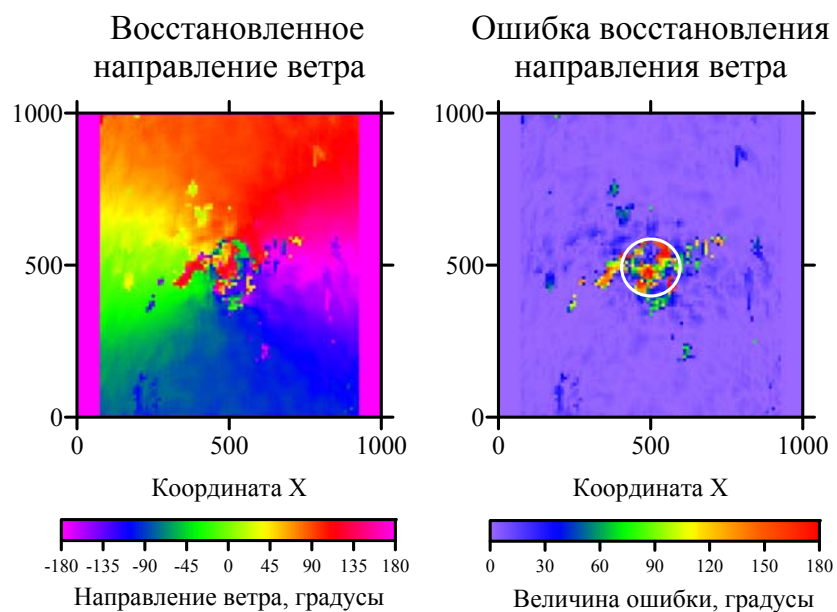


Рисунок 4.13 — Результаты восстановления направления ветра по трем частотам. Белым обозначена область, в которой скорость ветра менее 3 м/с

Повысить точность восстановления ветра, а точнее, сгладить полученное поле можно с помощью усреднения. Это связано с тем, что ветер над океаном обладает пространственной корреляцией, т.е. направление ветра в соседних областях, отстоящих друг от друга, скажем на 20–30 км, не может сильно различаться. Результат усреднения областей (для наглядности 3×3 элемента) приведен на рисунке 4.14. В результате усреднения получено гладкое поле.

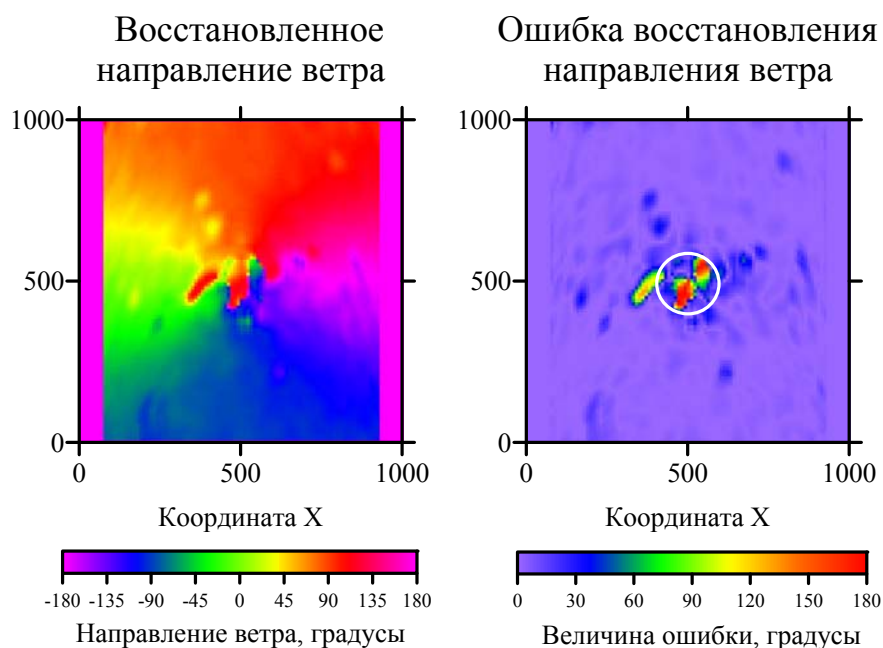


Рисунок 4.14 — Усредненный результат восстановления направления ветра по трем частотам. Белым обозначена область, в которой скорость ветра менее 3 м/с

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 (рисунок 4.15 и 4.16).

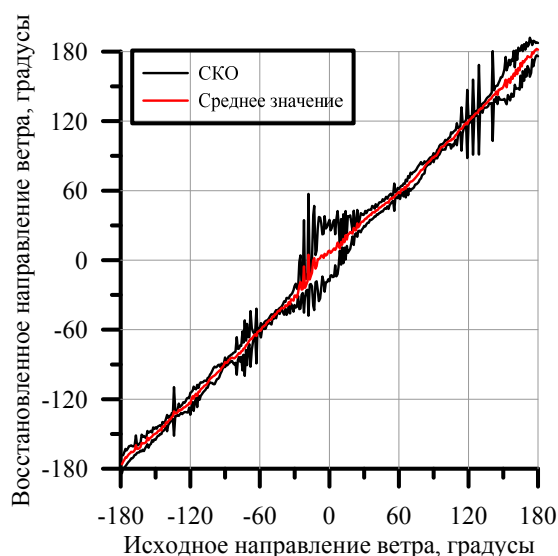


Рисунок 4.15 — Корреляция между исходным и восстановленным направлением ветра, а также СКО

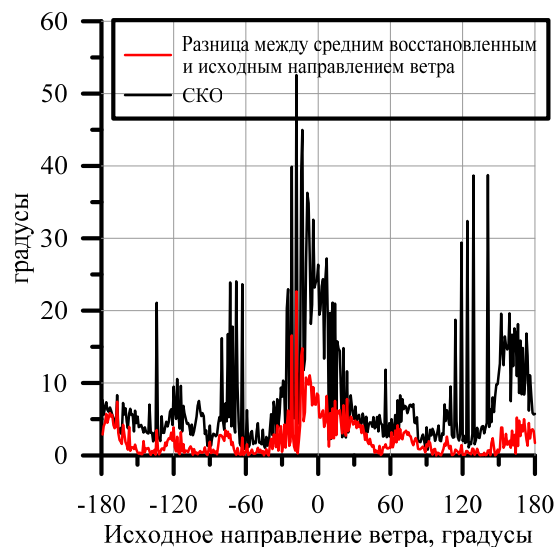


Рисунок 4.16 — Погрешность определения направления ветра

По представленным на рисунках 4.15 и 4.16 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° 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.

4.4. Восстановление направления ветра по спутниковым измерениям

Как было отмечено в главе 1, среди всех микроволновых приборов, размещенных на искусственных спутниках Земли, есть только один (WindSat), который проводит измерения в полном поляриметрическом базисе (измеряет все четыре параметра Стокса). Данный прибор установлен на спутнике Coriolis, который был запущен в 2003 г. и работает по настоящее время (январь 2018 г.). Его геометрия сканирования (рисунок 4.17)

такова, что как в направлении полета, так и в обратном направлении выполняется измерение системы подстилающая поверхность-атмосфера.

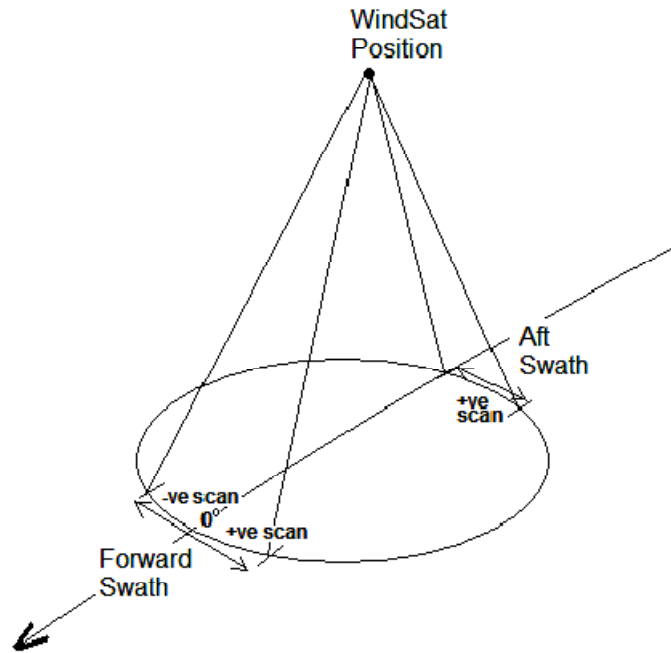


Рисунок 4.17 — Геометрия сканирования прибора WindSat [Narvekar et al., 2008]

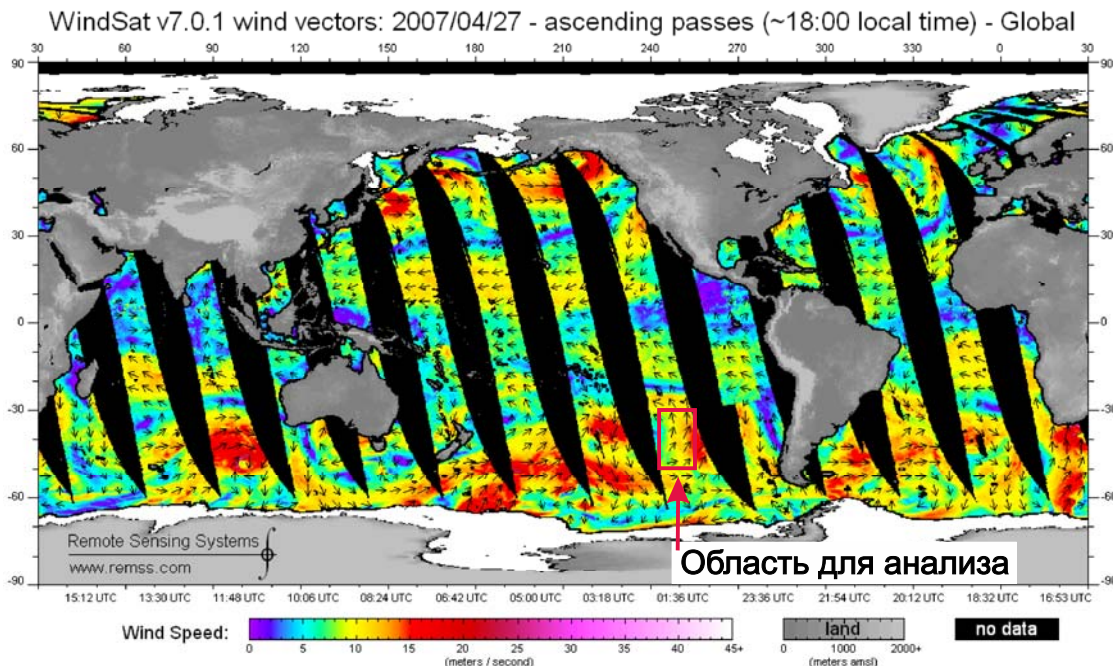


Рисунок 4.18 — Карта скорости и направления ветра, взятая с сайта <http://www.remss.com/missions/windsat/>

Ширина передней полосы обзора (forward swath) составляет в среднем для всех каналов 950 км (угол обзора 68°) и задней полосы обзора (aft swath) — 350 км (угол обзора 23°) [Gaiser et al, 2004]. Таким образом, в небольшой полосе (350 км) выполняется требование к наличию двух измерений одного элемента поверхности под разными углами наблюдения выше предложенного алгоритма. Чувствительность радиометрических приемников по третьему и четвертому параметрам Стокса данного прибора на частотах 10,7; 18,7 и 37 ГГц составляет 0,25 К [Gaiser et al., 2004].

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 г. На рисунке 4.18 показана карта скорости и направления ветра и отмечена область для тестирования. Геофизические параметры системы океан-атмосфера приведены на рисунке 4.19 для данной области крупным планом, и на рисунке 4.20 приведены измеренные радиометрами значения третьего параметра Стокса и азимутальный угол наблюдения для передней и задней полос обзора.

Так как для определения направления ветра необходимы измерения одной и той же поверхности под разными углами наблюдения, то результирующая полоса, где производится восстановление ветра, будет уже как передней, так и задней полосой обзора прибора WindSat. Так же для решения задачи используются только данные, где есть информация о геофизических параметрах системы океан-атмосфера, так как они нужны для расчета модельной зависимости третьего параметра Стокса от относительного направления ветра. Как и в п. 4.3. погрешности, связанные с определением геофизических параметров, и ошибки моделирования не учитываются (учитывается только чувствительность приборов).

На рисунках 4.19–4.21 все параметры (для удобства отображения) приведены к равномерной сетке (0,25°), но при расчетах используются данные с точными значениями координат.

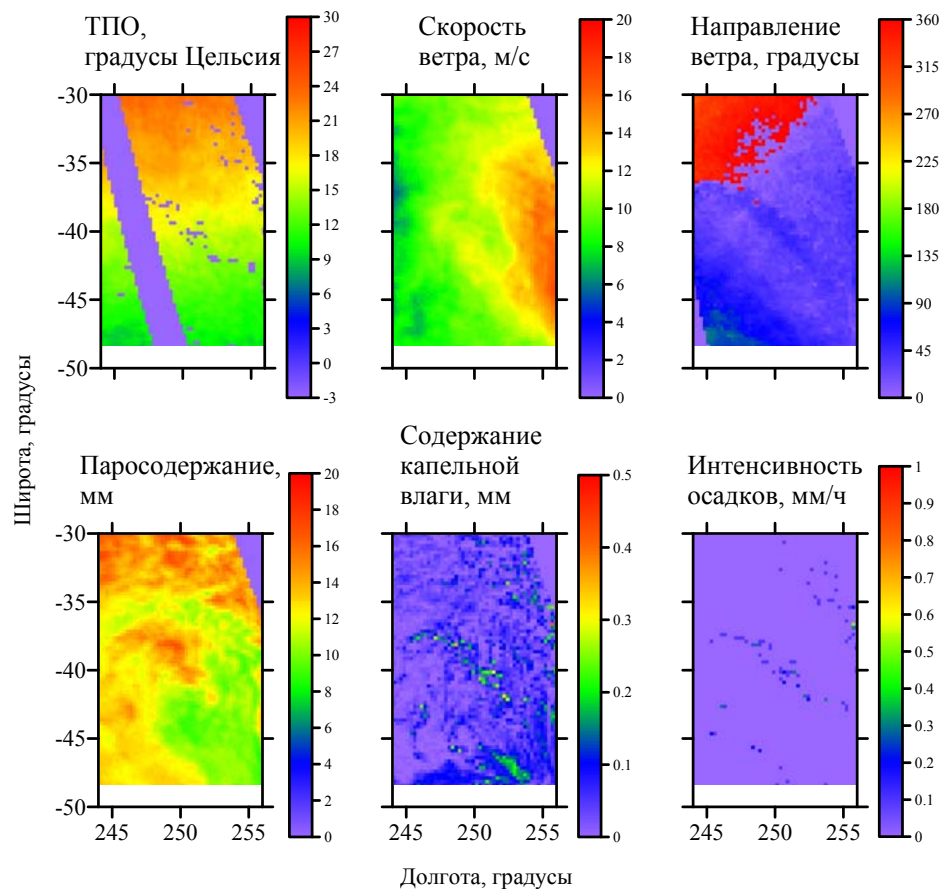


Рисунок 4.19 — Геофизические параметры для тестовой области.

<http://www.remss.com/missions/windsat/>

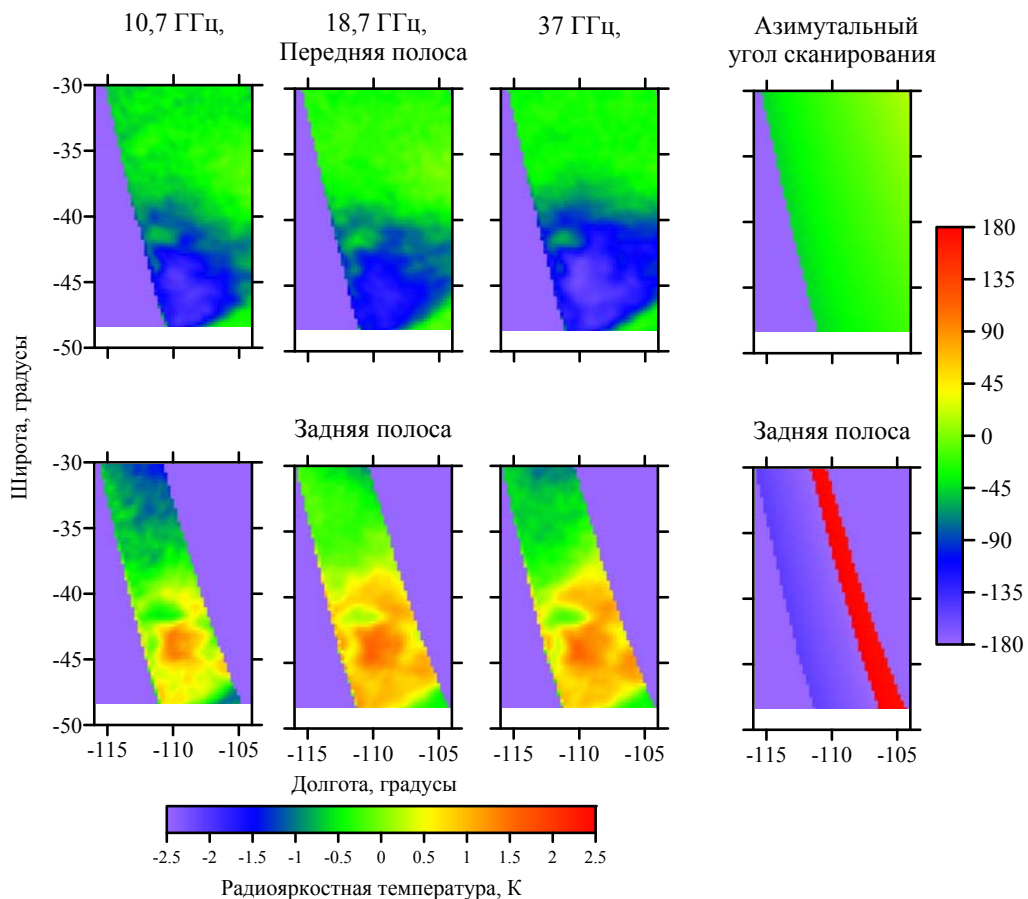


Рисунок 4.20 — Радиояростная температура на трех частотах и азимутальные углы визирования прибора WindSat. <http://www.ifremer.fr/opendap/cerdap1/oceanflux/satellite/11/coriolis/windsat>

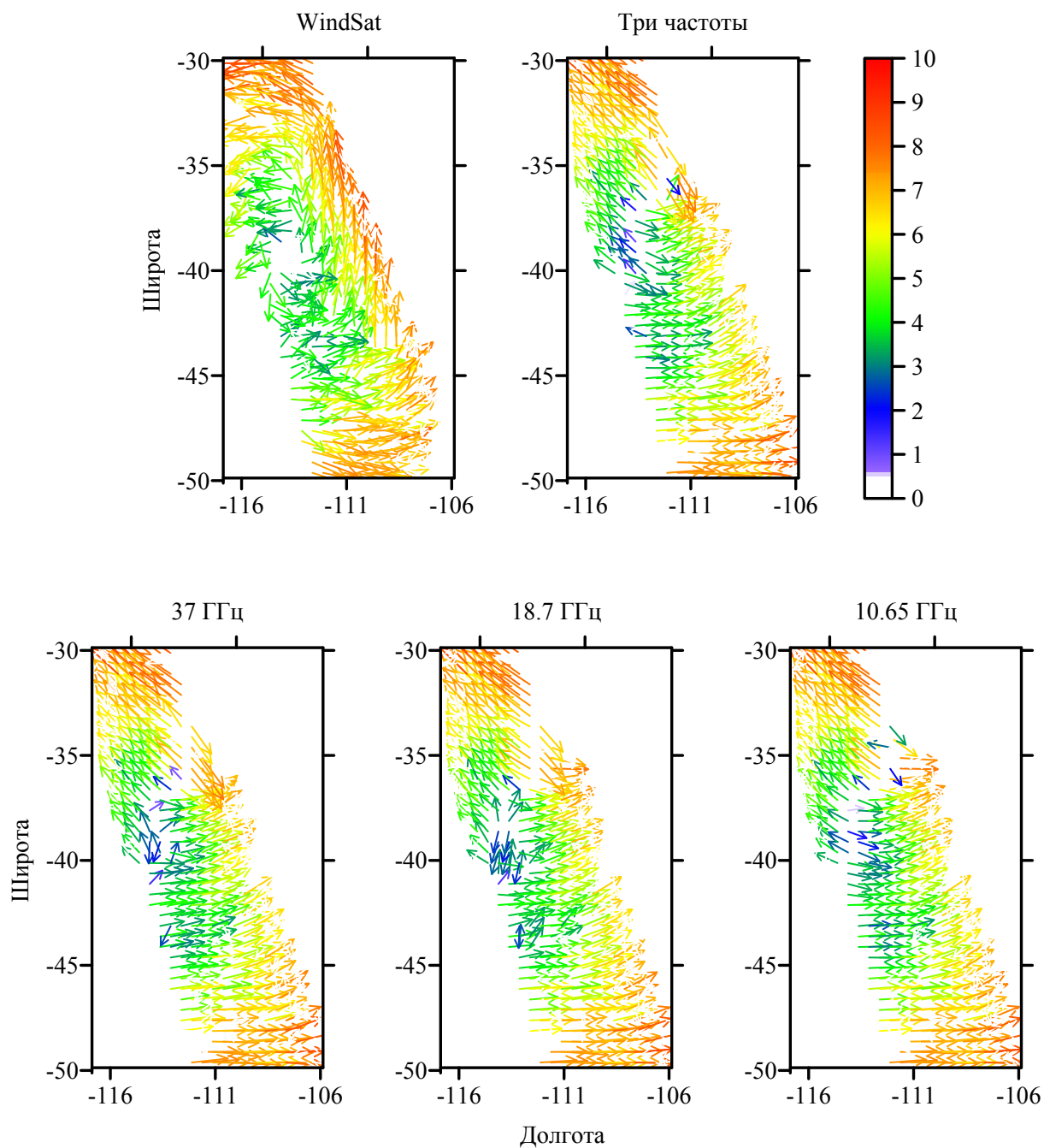


Рисунок 4.21 — Результаты восстановления направления ветра по измерениям третьего параметра Стокса прибором WindSat

Представленные на рисунках 4.19 и 4.20 данные были проанализированы предложенным алгоритмом четыре раза. Первые три раза расчеты выполнялись для каждой частоты по отдельности, а последний раз определение направления ветра производилось сразу по трем частотам, по максимуму произведения вероятностей, определенных для трех частот.

Результаты представлены на рисунке 4.21 в виде цветных векторных карт направления ветра, цвет соответствует скорости ветра. По представленным картам видно,

что есть области, где определенное направление ветра коррелированно с данными, предлагаемыми на сайте <http://www.remss.com/missions/windsat/>, однако есть области где расхождение достаточно сильное.

Например, в области с широтой $-50\dots-45^\circ$ и долготой $-112\dots-106^\circ$ восстановленное направление ветра, как по каждой из частот в отдельности, так и совместно имеет тоже направление, что и на первой карте рисунка 4.21. Также направление ветра коррелированно, немного слабее в области с координатами $-45\dots-40^\circ$ широты и $-111\dots-116^\circ$ долготы. В этой области скорость ветра порядка 3–5 м/с, а величина третьего параметра Стокса пропорциональна скорости ветра, поэтому точность определения направления с уменьшением скорости ветра падает. В области с широтой -39° и долготой -113° скорость ветра менее 3 м/с и направление ветра при таких скоростях определяется с неоднозначностями (разное направление векторов на рисунке).

Для области с координатами широты $-32\dots-45^\circ$ и долготы $-106\dots-111^\circ$ на всех трех частотах (и по трем частотам сразу) восстановленное направление ветра не коррелированно, и для верхней части этой области корреляция обратная. Такие ошибки связаны с тем, что, как видно на рисунках 4.19 и 4.20, направление ветра в этой области идет вдоль линии наблюдения в передней и задней полосах обзора. Если обратиться к рисунку 4.1 на котором приведена зависимость третьего параметра Стокса $S_3(\varphi, \dots)$ от относительного направления ветра, то очевидно, что при направлении ветра коллинеарном направлениям визирования 0 и 180° величина $S_3(\varphi, \dots)$ близка к нулю. В этом случае существует неопределенность в восстановлении направления.

С целью устранения неопределенности можно применить коррекцию определения направления за счет сравнения с соседними точками, где неопределенность отсутствует, т.е. после решения обратной задачи провести уточнение. Такие подходы широко применяются при анализе спутниковых измерений.

4.5. Выводы по главе 4

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, аналогичную продуктам, предлагаемым компанией Remote Sensing Systems (<http://www.remss.com/>).

Заключение

В настоящей работе выполнено исследование и проведено моделирование собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности в микроволновом диапазоне длин волн на частоте 37,5 ГГц. Основными результатами работы являются:

1. Анализ работ, посвященных 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 $45\text{--}55^\circ$ и 65° . 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

в 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 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°, температура воды 12,5–25 °С 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° 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 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 направлением 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 литературы

[Анискович и др., 2007] *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.

[Антонов, Садовский, 2007] *Антонов В.С., Садовский И.Н.* Исследование параметров морского волнения в рамках международного натурального эксперимента CAPMOS'05: контактные измерения с использованием струнного волнографа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. № 1. С. 254–261.

[Башаринов и др., 1974] *Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т.* Радиоизлучение земли как планеты. М.: Наука, 1974. 184 с.

[Бендат, Пирсол, 1989] *Бендат Дж., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. М.: Мир, 1989. 540 с. ISBN 5-03-001071-8.

[Барсуков и др., 2011] *Барсуков И.А., Никитин О.В., Стрельцов А.М., Черный И.В., Чернявский Г.М.* Предварительная обработка данных СВЧ-радиометра МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. № 2. С. 257–263.

[Беспалова и др., 1979] *Беспалова Е.А., Веселов В.М., Глотов А.А., Милицкий Ю.А., Мировский В.Г., Покровская И.В., Попов А.Е., Раев М.Д., Шарков Е.А., Эткин В.С.* Исследование анизотропии ветрового волнения по вариациям поляризованного теплового излучения // Докл. АН СССР. 1979. Т. 246. № 6. С. 1482–1485.

[Беспалова и др., 1982] *Беспалова Е.А., Веселов В.М., Гершензон В.Е., Милицкий Ю.А., Мировский В.Г., Покровская И.В., Раев М.Д., Семин А.Г., Смирнов Н.К., Скачков В.А., Трохимовский Ю.Г., Хатин Ю.Б., Чистяков В.Н., Шарков Е.А., Эткин В.С.* Об определении скорости приповерхностного ветра по измерениям поляризационной анизотропии собственного и рассеянного СВЧ-излучения // Исследование Земли из космоса. 1982. № 1. С. 87–94.

[Булатов и др., 2003] *Булатов М.Г., Кравцов Ю.А., Кузьмин А.В., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Раев М.Д., Скворцов Е.И., Александров Д.В.* Микроволновые исследования морской поверхности в прибрежной зоне (Геленджик 1999–2002). М.: КДУ, 2003. 143 с.

[Гершензон и др., 1986] *Гершензон В.Е., Ирисов В.Г., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С.* Азимутальные эффекты при критических явлениях в тепловом

радиоизлучении шероховатой поверхности: препринт.Пр-1104. М.: ИКИ АН СССР, 1986. 26 с.

[Гречко и др., 1991] *Гречко С.И., Ирисов В.Г., Кузьмин А.В., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С.* Характеристики собственного СВЧ-излучения морской поверхности на настильных углах наблюдения:препринт. Пр-1729. М.: ИКИ РАН, 1991. 41 с.

[Гурвич, Кутуза, 2010] *Гурвич А.С., Кутуза Б.Г.* «Космос-243» — первый в мире эксперимент по исследованию земли из космоса радиофизическими методами // Исследование Земли из космоса. 2010. № 2. С. 14–25.

[Ирисов и др., 1987] *Ирисов В.Г., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С.* Радиотепловая спектроскопия морской поверхности // ДАН СССР. 1987. Т. 297. № 3. С. 587–589.

[Ирисов и др., 1990] *Ирисов В.Г., Кузьмин А.В., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С.* Азимутальные зависимости собственного СВЧ-излучения поверхности океана на настильных углах наблюдения // Исследование Земли из космоса. 1990. № 6. С. 79–86.

[Кравцов и др., 1978] *Кравцов Ю.А., Мировская Е.А., Попов А.Е., Троицкий И.А., Эткин В.С.* Критические явления при тепловом излучении периодически неровной водной поверхности // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1978.Т. 14. № 7. С. 733–739.

[Кузьмин и др., 2009] *Кузьмин А.В., Горячкин Ю.А., Ермаков Д.М., Ермаков С.А., Комарова Н.Ю., Кузнецов А.С., Репина И.А., Садовский И.Н., Смирнов М.Т., Шарков Е.А., Чухарев А.М.* Морская гидрофизическая платформа «Кацивели» как подспутниковый полигон на Черном море// Исследование Земли из космоса. 2009. № 1. С. 31–44.

[Кузьмин и др., 2015] *Кузьмин А.В., Репина И.А., Садовский И.Н., Селунский А.Б.* Микроволновые радиометрические исследования морской поверхности // Исследование Земли из космоса. 2015. № 5. С. 76–97.

[Кузьмин и др., 2017] *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 // 15я всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: тез. докл. 2017.

[Поспелов, 2004] *Поспелов М.Н.* Применение поляризационной радиометрии в дистанционном зондировании: история и перспективы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. № 1. С. 58–69.

[Раев и др., 2015] *Раев М.Д., Шарков Е.А., Тихонов В.В., Репина И.А., Комарова Н.Ю.* Особенности стохастического режима временной эволюции арктического ледового покрова за период 1987–2014 гг. по данным микроволнового спутникового

зондирования на основе алгоритма NASATeam 2 // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 41–48.

[Садовский, 2007] Садовский, И.Н. Поляризационные радиотепловые методы в исследованиях параметров морского волнения // И.Н.Садовский; Дис. канд. физ.-мат. наук. М.: ИКИ РАН, 2007. 184 с.

[Садовский, 2008а] Садовский И.Н. Методика восстановления параметров спектра ветрового волнения на основе данных угловых радиополяриметрических измерений // Исследование Земли из космоса. 2008. № 6. С. 1–7.

[Садовский, 2008б] Садовский И.Н. Методика дистанционного определения характеристик ветрового волнения: 1. Расчет радиоярких контрастов взволнованной водной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 192–198.

[Садовский и др., 2009] Садовский И.Н., Кузьмин А.В., Поспелов М.Н. Исследование параметров спектра ветрового волнения по данным дистанционных радиополяриметрических измерений // Исследование Земли из космоса. 2009. № 2. С. 1–8.

[Садовский, Сазонов, 2010] Садовский И.Н., Сазонов Д.С. Исследование динамики спектра ГКВ по результатам серии натуральных экспериментов CAPMOS // 8-я всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: тез. докл. 2010. С. 229.

[Садовский и др., 2013] Садовский И.Н., Кузьмин А.В., Шарков Е.А., Сазонов Д.С., Пашинов Е.В., Ашеко А.А., Батулин С.А. Анализ моделей диэлектрической проницаемости водной среды, используемых в задачах дистанционного зондирования акваторий: препринт. Пр-2172. М.: ИКИ РАН, 2013. 59 с.

[Садовский и др., 2014] 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 // Исследование Земли из космоса. 2014. № 6. С. 79–92.

[Садовский, Сазонов, 2017] Садовский И.Н., Сазонов Д.С. Определение модуля скорости приповерхностного ветра по данным многочастотного радиометра-спектрометра МИРС // 15-я всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: тез. докл. 2017.

[Сазонов, 2017а] Сазонов Д.С. Корреляционный анализ экспериментальных дистанционных измерений и моделей микроволнового излучения взволнованной водной поверхности. // Исследование Земли из космоса. 2017. № 3. С. 53–64.

[Сазонов, 2017б] *Сазонов Д.С.* Моделирование микроволнового излучения взволнованной морской поверхности на основе экспериментальных данных. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т 14. № 3. С. 271–287.

[Сазонов и др., 2013] *Сазонов Д.С., Кузьмин А.В., Садовский И.Н.* Исследование азимутальной анизотропии собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности в экспериментах CAPMOS:препринт. Пр-2170. 2013.С. 23.

[Сазонов и др., 2014] *Сазонов Д.С., Дулов В.А., Садовский И.Н., Чечина Е.В., Кузьмин А.В.* Подспутниковые измерения асимметрии уклонов ветровых волн гравитационного диапазона // Украинский метрологический журн. 2014.№ 1.С. 54–58.

[Сазонов и др., 2016] *Сазонов Д.С., Кузьмин А.В., Садовский И.Н.* Экспериментальные исследования зависимости интенсивности радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности от скорости приводного ветра // Исследование Земли из космоса. 2016. № 1-2. С. 25–34.

[Смирнов и др., 2016] *Смирнов М.Т., Кутуза Б.Г., Саворский В.П., Турыгин С.Ю.* Лабораторный радиометр спектрометр как прототип для создания СВЧ-гиперспектрометров космического базирования // 14-я всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: тез. докл. 2016.

[Трохимовский, Эткин, 1985] *Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С.* Лабораторные и натурные исследования критических явлений в радиотепловом излучении взволнованной водной поверхности: препринт.Пр-988. М.: ИКИ АН СССР, 1985. 23 с.

[Трохимовский и др., 1999] *Трохимовский Ю.Г., Кравцов Ю.А., Кузьмин А.В.* Применение микроволновых радиометрических методов для спектрометрии поверхности океана и прецизионных измерений температуры скин-слоя // Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование / под ред. Пелиновского Е.Н., Талановой В.И. Нижний Новгород: ИПФ, 1999.Т. 2. С. 382–407.

[Чечина, 2013] *Чечина Е.В.* База волнографических данных, полученных со стационарной океанографической платформы ЭО МГИ НАН Украины // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа: сб. научн. тр. / НАН Украины. Севастополь: МГИ, 2013. № 27.С. 215–220.

[Шарков, 2014] *Шарков Е.А.* Радиотепловое дистанционное зондирование земли: Физические основы. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с. ISSN 2075-6836.

[Шарков, 2017] *Шарков Е.А.* Научные задачи космического эксперимента «Конвергенция» на РС МКС // 15-я всероссийская открытая ежегодная конференция

«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: тез. докл. 2017.

[Шутко, 1986] *Шутко А.И.* СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 190 с.

[Apel, 1994] *Apel J.R.* An improved ocean surface wave vector spectrum // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. No. C8. P. 16.269–16.291.

[Aziz et al., 2005] *Aziz M.A., Reising S.C., Asher W.E., Allen Rose L., Gaiser P.W., Horgan K.A.* Effects of Air–Sea Interaction Parameters on Ocean Surface Microwave Emission at 10 and 37 GHz // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2005. V. 43. No. 8. P. 1763–1774.

[Bulatov et al., 2000] *Bulatov M.G., Raev M.D., Skvortsov E.I.* Experimental study of the Third Stokes Parameter in microwave emission from the sea surface perturbed by rain // Physics of Vibrations. 2000. V. 8(3). P. 172–178.

[Draper et al., 2015] *Draper D., Newell D., Wentz F., Krimchansky S., Skofronick-Jackson G.* The Global Precipitation Measurement (GPM) Microwave Imager (GMI): Instrument overview and early on-orbit performance // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. V. 8. No. 7. P. 3452–3462.

[Durden, Vesecky, 1985] *Durden S.L., Vesecky J.F.* A physical radar cross-section model for a wind-driven sea with swell // IEEE J. Oceanic Engineering. 1985. V. OE-10. No. 4. P. 445–451.

[Dzura et al., 1992] *Dzura M.S., Etkin V.S., Khrupin A.S., Pospelov M.N., Raev M.D.* Radiometers-Polarimeters: Principles of Design and Applications for Sea Surface Microwave Emission Polarimetry // Intern. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS'92). Digest, Houston, TX, USA. 1992. V. 2. P. 1432–1434.

[Elfouhaily et al., 1997] *Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D.* A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. No. C7. P. 15.781–15.796.

[Font et al., 2010] *Font J., Camps A., Borges A., Martin-Neira M., Boutin J., Reul N., Kerr Y., Hahne A., Mecklenburg S.* SMOS: The Challenging Sea Surface Salinity Measurement from Space // Proc. IEEE. 2010. V. 98. No. 5. P. 649–665.

[Gaiser et al., 2004] *Gaiser P.W., St Germain K.M., Twarog E.M., Poe G.A., Purdy W., Richardson D., Grossman W., Jones W.L., Spencer D., Golba G., Cleveland J., Choy L., Bevilacqua R.M., Chang P.S.* The WindSat space borne polarimetric microwave radiometer: sensor description and early orbit performance // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2004. V. 42. No. 11. P. 2347–2361.

[Gasparovic, Etkin, 1994] *Gasparovic R.F., Etkin V.S.* An overview of the Joint US/Russia Internal wave Remote Sensing Experiment // Proc. IGARSS'94. Pasadena. 1994. P. 741–743.

[Germain et al., 2002] *Germain K.M., Poe G.A., Gaiser P.W.* Polarimetric emission model of the sea at microwave frequencies and comparison with measurements // Progr. Electromagn. Res.2002. V. 37.P. 2–32.

[Gloersen et al., 1984] *Gloersen P., Cavalieri D.J., Chang A.T.C., Wilheit T.T., Campbell W.J., Johannessen O.M., Katsaros K.B., Kunzi K.F., Ross D.B., Staelin D., Windsor E.P.L., Barath F.T., Gudmandsen P., Langham E., Ramseier R.O.* Summary of Results From the First NIMBUS 7 SMMR Observations // J. Geophys. Res. 1984. V. 89.P. 5335–5344.

[Hollinger, 1970] *Hollinger J.P.* Passive microwave measurements of the sea surface // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. No. 2. P. 5209–5213.

[Hollinger, 1971] *Hollinger J.P.* Passive microwave measurements of sea surface roughness // IEEE Trans. Geoscience Electronics. 1971. V. GE-9. No. 3.P. 165–169.

[Hollinger et al., 1990] *Hollinger J., Peirce J.L., Poe G.* SSM/I Instrument Evaluation // IEEE Trans Geosci Rem Sens. 1990. V. 28. No. 5 P. 781–790.

[Irisov et al., 1991] *Irisov V.G., Kuzmin A.V., Pospelov M.N., Trokhimovski Yu.G., Etkin V.S.* The dependence of sea brightness temperature on surface wind direction and speed. Theory and experiment // Proc. Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'91). Espoo, Finland. 1991. P. 1297–1300.

[Kravtsov et al., 2000] *Kravtsov Yu.A., Kuz'min A.V., Lavrova O.Yu., Mitnik L.M., Mityagina M.M., Sabinin K.D., Trokhimovskii Yu.G.* Surface manifestation of oceanic internal waves viewed in radar images polarization features // Earth observation and Remote Sensing. 2000. V. 15. No. 6. P. 909–926.

[Kunkee et al., 2008] *Kunkee D.B., Poe G.A., Boucher D.J., Swadley S.D., Hong Y., Wessel J.E., Uliana E.A.* Design and Evaluation of the First Special Sensor Microwave Imager/Sounder // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.2008. V. 46. No. 4.P. 863–883.

[Kuzmin et al., 2000] *Kuzmin A., Pospelov M., Trokhimovskii Yu.* Sea surface parameters retrieval by passive microwave polarimetry // Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Earth's Surface and Atmosphere / eds. P. Pampaloni, S. Paloscia. Zeist: VSP Intern. Science Publishers, 2000. P. 3–11.

[Le Vine et al., 2010] *Le Vine D.M., Lagerloef G., Torrusio S.E.* Aquarius and remote sensing of sea surface salinity from space // Proc. IEEE. 2010.V. 98.No. 5.P. 688–703.

[Meissner, Wentz, 2002] *Meissner T., Wentz F.J.* An updated analysis of the ocean surface wind direction signal in passive microwave brightness temperatures // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2002.V. 40.No. 6.P. 1230–1240.

[Meissner, Wentz, 2004] *Meissner T., Wentz F.J.*, The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2004.V. 42.No. 9.P. 1836–1849.

[Meissner, Wentz, 2012] *Meissner T., Wentz F.J.* The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and earth incidence angles, // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2012. V. 50. No. 8. P. 3004–3026.

[Mironov et al., 2012] *Mironov A.S., Yurovskaya M.V., Dulov V.A., Hauser D., Guerin C.A.* Statistical characterization of short wind waves from stereo images of the sea surface // J. Geophys. Research. 2012.V. 117. No. C00J35. 16 p. DOI:10.1029/2011JC007860.

[Narvekar et al., 2008] *Narvekar P.S., Heygster G., Tonboe R.* Analysis of WindSat data over Arctic Sea ice. Final Version: Technical Report for the EUMETSAT Satellite Application Facility on Ocean and Sea Ice Visiting Scientist Activity SG08-VSQ1; Investigations into use of passive polarimetric microwave radiometry for sea ice retrieval. Bremen, 2008. 81 p.

[Nordberg et al., 1968] *Nordberg W., Conaway J., Thaddeus P.* Microwave observations of sea state from aircraft: NASA preprint X-620-68-414. 1968.

[Sadovsky et al., 2009] *Sadovsky I.N., Kuzmin A.V., Pospelov M.N.* Dynamics of Short Sea Wave Spectrum Estimated From Microwave Radiometric Measurements // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2009. V. 47. No. 9. P. 3051–3056.

[Shannon et al., 2006] *Shannon T.B., Ruf C.S., Lyzenga D.R.* An emissivity-based wind vector retrieval algorithm for the Windsat polarimetric radiometer // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2006. V. 44. No. 3. P. 611–621. DOI: 10.1109/TGRS.2005.859351.

[Sasaki et al., 1987] *Sasaki Ya., Asanuma I., Muneyama K., Naito G., Suzuki T.* The dependence of sea-surface microwave emission on wind speed, frequency, incidence angle, and polarization over frequency range from 1 to 40 GHz // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1987. V. GE-25. No. 11. P. 138–146.

[Sazonov et al., 2016] *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, V. 52, No. 9.P. 911–919. DOI: 10.1134/S0001433816090218.

[Stogryn, 1967] *Stogryn A.* The apparent temperature of the sea at microwave frequencies // IEEE Trans. Antennas Propagat. 1967. V. AP-15. No. 2.P. 278–286.

[Stogryn, 1967] *Stogryn A.* Equations for calculating the dielectric constant for saline

water // IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques. 1971. V. 19. N. 8. P. 733–736.

[Tran et al., 2002] *Tran N., Vandemark D., Ruf C.S., Chapron B.* The Dependence of Nadir Ocean Surface Emissivity on Wind Vector as Measured With Microwave Radiometer // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensi. 2002. V. 40. No. 2. P. 515–523. DOI: 10.1109/36.992827.

[Trokhimovskii et al., 1995] *Trokhimovskii Yu.G., Bolotnikova G.A., Etkin V.S., Grechko S.I., Kuzmin A.V.* The dependence of s-band sea surface brightness temperature on wind vector at normal incidence // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1995. V. 33. No. 4. P. 1085–1088.

[Trokhimovskii et al., 2000] *Trokhimovskii Y.G., Irisov V.G., Westwater E.R., Fedor L.S., Leuski V.E.* Microwave polarimetric measurements of the sea surface brightness temperature from a blimp during the Coastal Ocean Probing Experiment (COPE) // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. No. C3. P. 6501–6516.

[Trokhimovskii et al., 2003] *Trokhimovski Yu., Kuzmin A., Pospelov M., Irisov V., Sadovsky I.* Laboratory polarimetric measurements of microwave emission from capillary waves // Radio Science. 2003. V. 38. No. 3. P. 8039.

[Van Melle et al., 1973] *Van Melle M.J., Wang H.H., Hall W.F.* Microwave radiometric observations of simulated sea surface conditions // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. No. 6. P. 969–976.

[Webster et al., 1976] *Webster J.W., Wilheit T.T., Ross D.B., Gloersen P.* Spectral characteristics of the microwave emission from a wind-driven foam-covered sea // J. Geophys. Res. 1976. V. 81. No. 18. P. 3095–3099.

[Wentz, 1983] *Wentz F.J.* A model function for ocean microwave brightness temperature // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. No. C3. P. 1892–1907.

[Wentz, 1992] *Wentz F.J.* Measurements of oceanic wind vector using satellite microwave radiometers // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1992. V. 30. No. 5. P. 960–972.

[Wentz, 1997] *Wentz F.J.* A well-calibrated ocean algorithm for Special Sensor Microwave/Imager // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. No. C4. P. 8703–8718.

[Wentz, Meissner, 2000] *Wentz F.J., Meissner T.* Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). Version 2: AMSR Ocean Algorithm / Remote Sensing Systems. 2000. 74 p. URL: <https://eosps0.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/atbd/atbd-amsr-ocean.pdf>.

[Wilheit, 1975] *Wilheit T.T.* Radiative transfer in a plane stratified dielectric: preprint / NASA Goddard Space Flight Center; Greenbelt, MD, United States. 1975. 24 p.

[Williams, 1969] *Williams G.F. Jr.* Microwave radiometry of the ocean and the possibility of marine wind velocity determination from satellite observations // J. Geophys. Res. 1969. V. 74(18).P. 4591–4594.

[Wu, Fung, 1972] *Wu S.T., Fung A.K.* A noncoherent model for microwave emission and backscattering from the sea surface // J. Geophys. Res. 1972. V. 77.P. 5917–5929.

[Yueh et al., 1999] *Yueh S.H., Wilson W.J., Dinardo S.J., Li F.K.* Polarimetric Microwave Brightness Signatures of Ocean Wind Direction // IEEE Trans. Geosci.RemoteSens. 1999. V. 37. No. 2. P. 949–959.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Корреляционный анализ и анализ невязок

П1.1. Постановка гипотез Н0 и Н1 об отсутствии и наличии значимой корреляции между экспериментальными данными и модельными расчетами

С целью определения взаимосвязи между экспериментальными данными и модельными расчетами крутизны радиационно-ветровой зависимости и ее силы был проведен корреляционный анализ. Существование взаимосвязи можно измерить коэффициентом корреляции ρ . В простом случае двух случайных величин x и y коэффициент корреляции задается формулой:

$$\rho_{xy} = \frac{C_{xy}}{\sigma_x \sigma_y},$$

где C_{xy} — ковариация x и y , определенная формулой $C_{xy} = M[(x - \mu_x)(y - \mu_y)]$, μ_x и μ_y — математическое ожидание величин x и y , определяемое как $\mu_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$; σ_x и σ_y — стандартные отклонения, определяемые как $\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2} = \sqrt{M(x - \mu_x)^2}$.

Коэффициент корреляции можно оценить по выборочным данным следующим образом:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \mu_y)^2}},$$

где N — количество пар значений модель-эксперимент.

Для оценки точности выборочного r_{xy} удобно использовать функцию от r_{xy} (Бендат, Пирсол, 1989):

$$w = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{1 + r_{xy}}{1 - r_{xy}} \right].$$

Также в работе (Бендат, Пирсол, 1989) сказано, что распределение случайной величины w можно аппроксимировать нормальным распределением со средним значением μ_w и дисперсией σ_w^2 вида:

$$\mu_w = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{1 + \rho_{xy}}{1 - \rho_{xy}} \right], \quad \sigma_w^2 = \frac{1}{N - 3}.$$

Из-за выборочной изменчивости оценок корреляции обычно приходится проверять, свидетельствует ли ненулевое значение выборочного коэффициента корреляции о существовании статистически значимой корреляции между изучаемыми случайными величинами. Сделать это можно, проверив гипотезу $\rho_{xy} = 0$, при этом отклонение гипотезы будет говорить о значимости корреляции. Из приведенных выше формул следует, что при $\rho_{xy} = 0$ выборочное распределение w будет нормальным со средним $\mu_w = 0$ и дисперсией $\sigma_w = 1/(N-3)$. Поэтому область принятия гипотезы о нулевой корреляции будет иметь вид:

$$\left[-z_{\alpha/2} \leq \frac{\sqrt{N-3}}{2} \ln \left[\frac{1+r_{xy}}{1-r_{xy}} \right] \leq z_{\alpha/2} \right],$$

где z — стандартная, нормально распределенная случайная величина. Если значение окажется вне этого интервала, то это будет признаком наличия статистической корреляции с уровнем значимости α .

Приведенные рассуждения позволили сформулировать гипотезу **H0**, говорящую об отсутствии корреляции между экспериментальными данными и модельными расчетами крутизны радиационно-ветровой зависимости, и гипотезу **H1**, говорящую о существовании статистически значимой корреляции. Таким образом, задав уровень достоверности $\alpha = 5\%$ получим $\pm z_{\alpha} = \pm 2$ (при $N = 50$ пар значений модель-эксперимент), а неравенство для принятия гипотезы **H0** примет вид:

$$\left[-2 \leq \frac{\sqrt{50-3}}{2} \ln \left[\frac{1+r_{xy}}{1-r_{xy}} \right] \leq 2 \right].$$

Чтобы каждый раз не производить расчет данного условия, выразим предыдущее неравенство относительно r_{xy} и получим $[-0,281 \leq r_{xy} \leq 0,281]$. Данное условие справедливо с точки зрения математики, однако, в поставленной физической задаче нас интересует только прямая корреляция. То есть, если $r_{xy} \leq 0,281$ принимается гипотеза **H0**, если $r_{xy} > 0,281$ — гипотеза **H1**. Чем дальше значение r_{xy} от границы, тем сильнее корреляция. Сравнение модельных расчетов и экспериментальных данных приведено на рисунках П1.1–П1.4.

П1.2. Определение величины невязки между экспериментальными данными и модельными расчетами

Коэффициент корреляции характеризует только похожесть функций между собой (ход зависимости) и не дает никакой информации об абсолютном уровне расхождения. Поэтому необходимо использовать дополнительный параметр, который определяет именно расхождение модельных и экспериментальных оценок между собой. В качестве такого параметра была выбрана функция невязки, которая рассчитывается по формуле $\xi = \sum_i (x_i - y_i)^2$, где i — вертикальный угол наблюдения; x и y — оценки крутизны радиационно-ветровой зависимости по модельным и экспериментальным данным. Нормирование функции невязки на количество точек не производится, так как во всех расчетах используются 50 усредненных значений радиационно-ветровой зависимости.

На рисунках П1.5–П1.8 представлены рассчитанные значения функции невязки ξ между экспериментальными измерениями и модельными расчетами радиационно-ветровой зависимости для вертикальной и горизонтальной поляризаций.

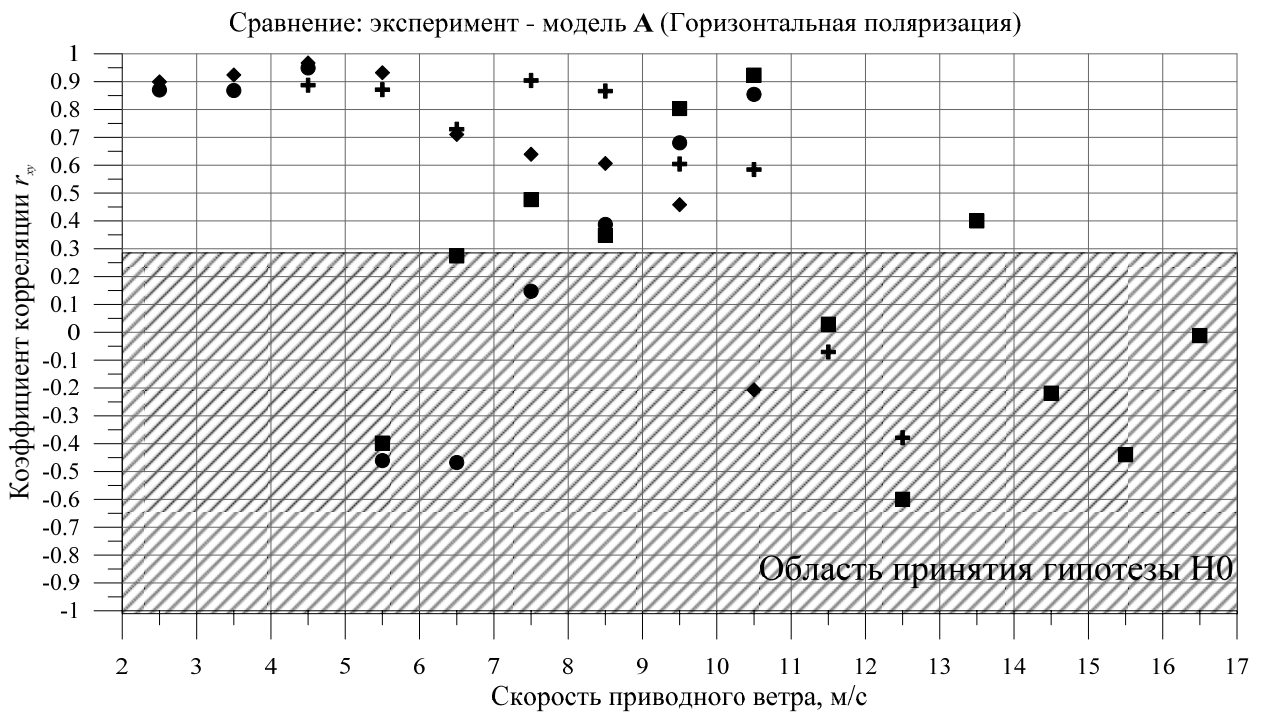


Рисунок П1.1 — Результаты корреляционного анализа экспериментальных данных и модели А



Рисунок П1.2 — Результаты корреляционного анализа экспериментальных данных и модели E

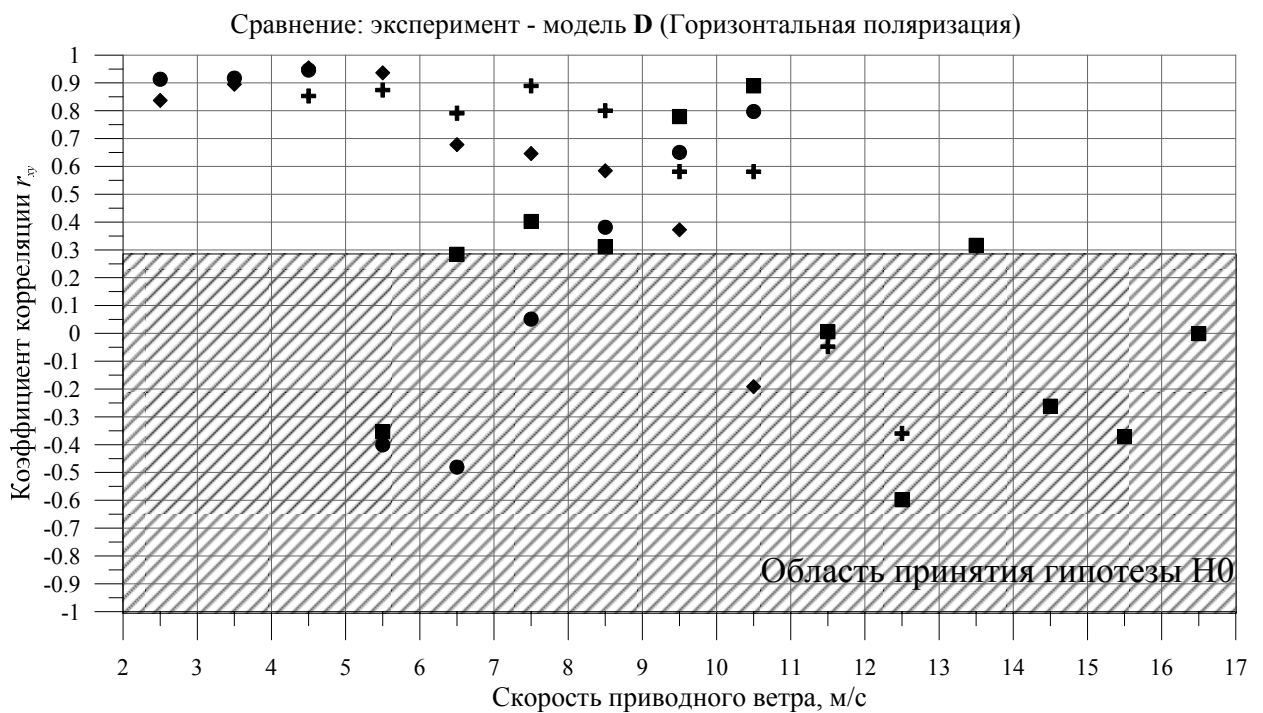
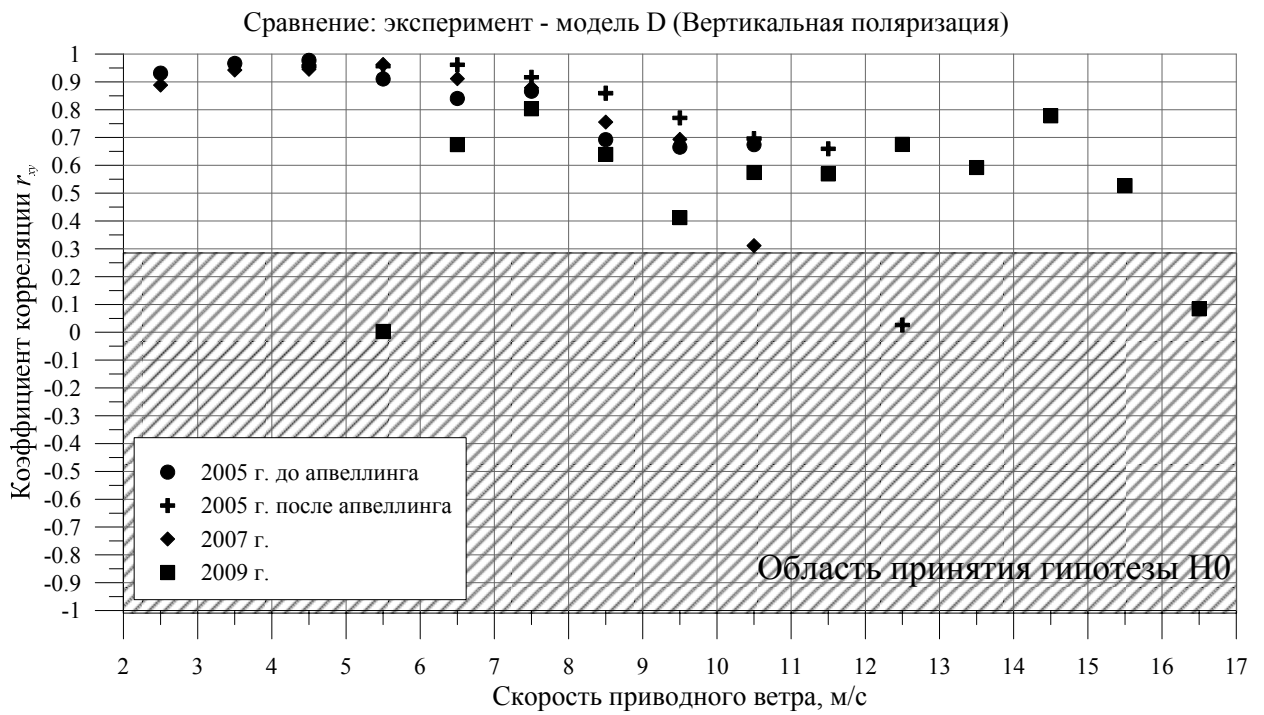


Рисунок П1.3 — Результаты корреляционного анализа экспериментальных данных и модели D

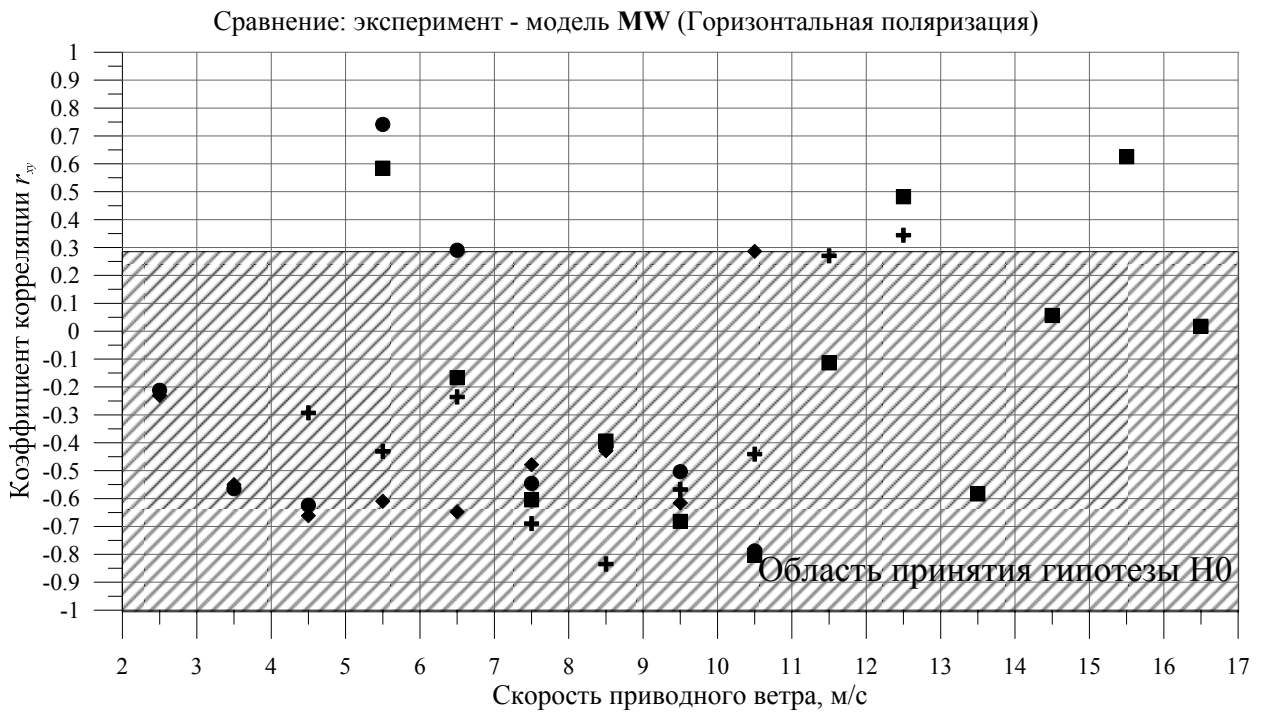


Рисунок П1.4 — Результаты корреляционного анализа экспериментальных данных и модели MW

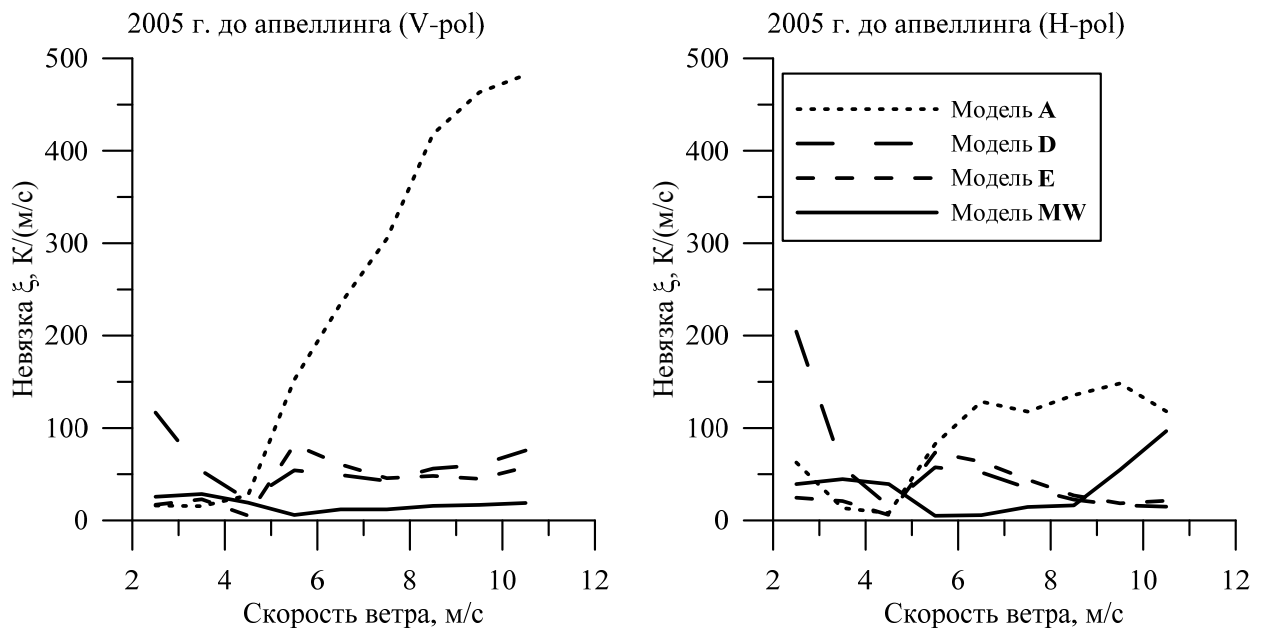


Рисунок П1.5 — Значения функции невязки между модельными расчетами и экспериментальными измерениями крутизны радиационно-ветровой зависимости для вертикальной и горизонтальной поляризаций. 2005 г.

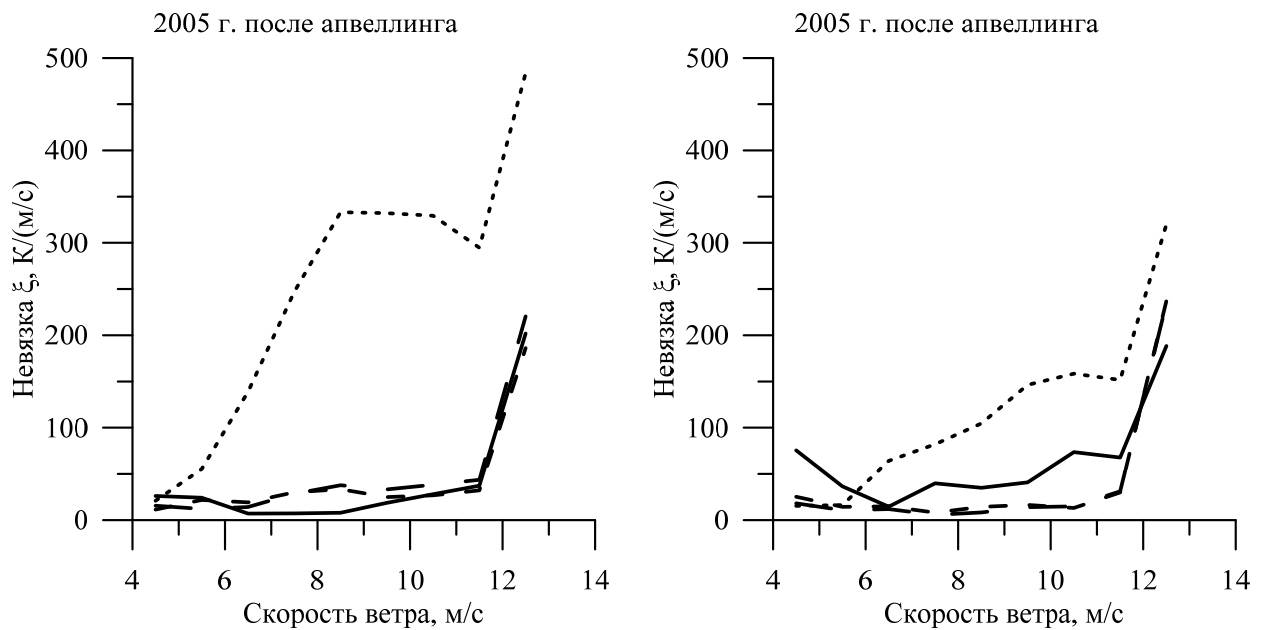


Рисунок П1.6 — Значения функции невязки между модельными расчетами и экспериментальными измерениями крутизны радиационно-ветровой зависимости для вертикальной и горизонтальной поляризаций. 2005 г.

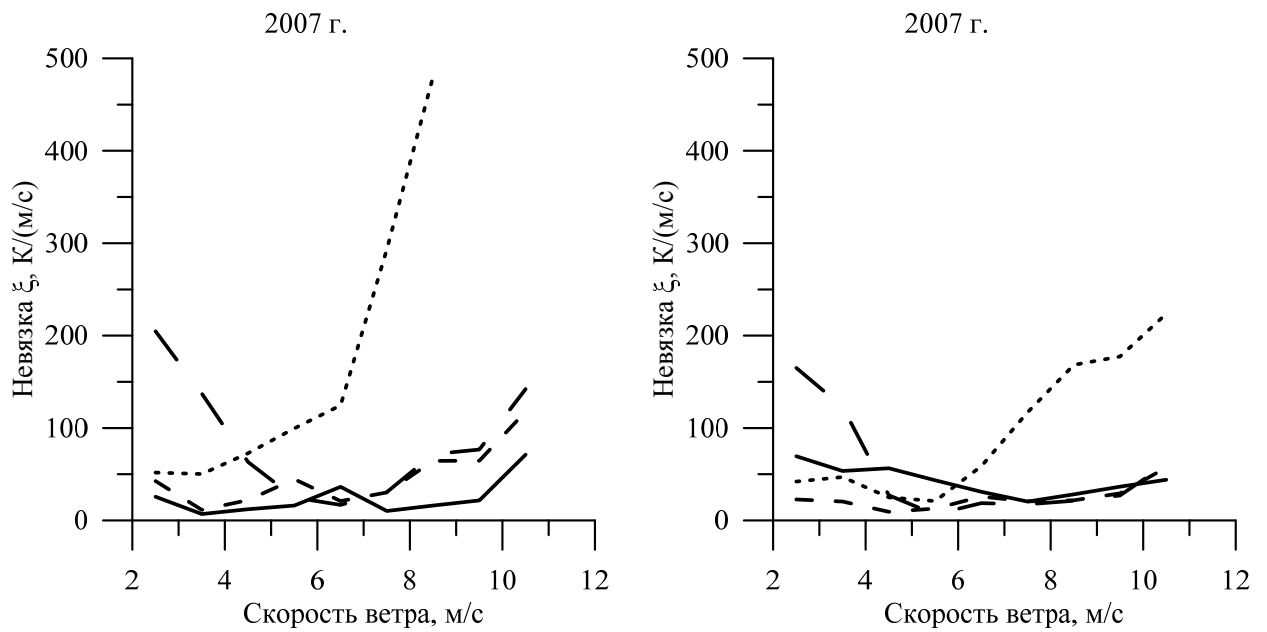


Рисунок П1.7 — Значения функции невязки между модельными расчетами и экспериментальными измерениями крутизны радиационно-ветровой зависимости для вертикальной и горизонтальной поляризаций. 2007 г.

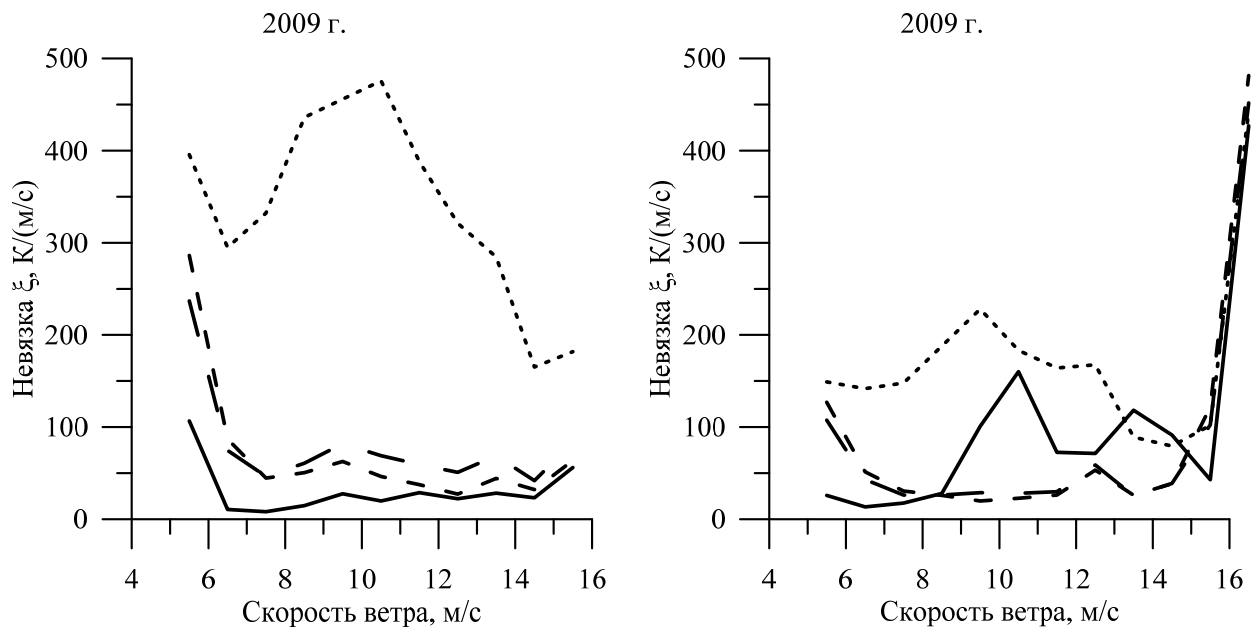


Рисунок П1.8 — Значения функции невязки между модельными расчетами и экспериментальными измерениями крутизны радиационно-ветровой зависимости для вертикальной и горизонтальной поляризаций. 2009 г.