

На правах рукописи

САДОВСКИЙ Илья Николаевич

**ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ РАДИОТЕПЛОВЫЕ МЕТОДЫ В ИССЛЕДОВАНИЯХ
ПАРАМЕТРОВ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ**

Специальность 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва

2007

Работа выполнена в Институте космических исследований
Российской Академии Наук

- Научный руководитель – доктор физико-математических наук,
профессор Шарков Е.А.
- Официальные оппоненты – доктор физико-математических наук,
Гранков А.Г.
Институт радиотехники и электроники РАН,
Фрязинский филиал
- кандидат физико-математических наук,
Литовченко К.Ц.
Федеральное государственное унитарное
предприятие «Российский научно-
исследовательский институт космического
приборостроения»
- Ведущая организация – Институт физики атмосферы
им. А.М. Обухова РАН

Защита диссертации состоится «10» апреля 2007 г. в 11 часов

На заседании диссертационного совета Д002.113.01

В Институте космических исследований РАН по адресу:

117810, г.Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, подъезд №2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

Института космических исследований РАН.

Автореферат разослан «06» марта 2007 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета, к.ф.-м.н.

Акимов В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время решение многих вопросов, имеющих большое научное и хозяйственное значение, невозможно без применения методов дистанционного зондирования, быстрое развитие которых обусловлено оперативностью сбора информации, охватом больших и зачастую труднодоступных районов, постоянным совершенствованием техники, повышением ее чувствительности и расширением используемых частотных диапазонов. Большую роль в этом играет использование искусственных спутников Земли в качестве носителей. Сбор информации с помощью космических аппаратов стимулировал развитие глобального подхода к исследованию природных ресурсов, атмосферных и океанических процессов, контролю за окружающей средой и т.д. В настоящее время, частотные диапазоны, в которых осуществляется дистанционное зондирование земной поверхности, охватывают почти все так называемые «окна прозрачности» в атмосфере.

С появлением микроволновой техники, способной решать задачи дистанционного зондирования как активного, так и пассивного, появились новые возможности в исследовании различных земных покровов, связанные с высокой проникающей способностью сантиметровых и дециметровых волн в земной атмосфере, сильной зависимостью уходящего теплового и рассеянного излучения от физических свойств исследуемых поверхностей. Наряду с этим, сантиметровые и миллиметровые волны с успехом используются для изучения атмосферы благодаря наличию в этом диапазоне линий поглощения кислорода и водяного пара.

Одним из важнейших объектов исследования методами дистанционного зондирования является Мировой океан. Важность океанических процессов и их поверхностных проявлений для понимания ряда вопросов с одной стороны, и фрагментарная обеспеченность контактными измерениями с другой, сделали дистанционные методы незаменимыми при изучении океана. Большое значение при этом имеет радиотепловая локация морской поверхности, т.к. уходящее тепловое излучение несет информацию о таких параметрах, как температура и соленость поверхностного слоя воды, наличие на поверхности пены и поверхностно-активных веществ и, наконец, характеристиках морского волнения, которые непосредственно связаны со скоростью и направлением приповерхностного ветра, а также с такими более тонкими особенностями, как проявление внутритрокеанических процессов на

поверхности океана. Радиометрия морской поверхности дает уникальную возможность, в совокупности с другими методами, изучать мелкомасштабную структуру волнения, т.к. тепловое излучение в сантиметровом диапазоне наиболее чувствительно именно к поверхностным волнам с периодами порядка длины электромагнитной волны, что соответствует капиллярным и гравитационно-капиллярным волнам (ГКВ). Область гравитационно-капиллярных волн труднодоступна исследованию прямыми волнографическими методами и в то же время играет важную роль в развитии и установлении волнения, а также в процессах взаимодействия океана и атмосферы. В связи с этим, представляется крайне важным установление количественных соотношений между характеристиками волнения в этой области и радиотепловыми контрастами морской поверхности, измеряемыми радиометрами. Это невозможно сделать без проведения модельных исследований с их последующей проверкой в ходе выполнения лабораторных экспериментов, позволяющих осуществлять точные измерения характеристик изучаемых поверхностей (в отличие от натуральных условий). Кроме того, повышение точности дистанционных методов радиотепловой локации морской поверхности напрямую связано с наличием данных подспутниковых натуральных измерений, обеспечивающих пространственное разрешение, сравнимое с размерами элементов разрешения приборов космического базирования.

Все перечисленные факты определяют *актуальность* данной работы.

Цель диссертационной работы

Спектры ветровых волн в гравитационно-капиллярном интервале исследованы крайне мало. Теоретическое описание затруднено сложностью нелинейных механизмов накачки энергии от ветра, потока энергии, импульса и волнового действия в пространстве волновых чисел, диссипацией за счет вязкости, поверхностных пленок, турбулентности, нелинейной диссипации, ограничивающей рост волн. Экспериментальные данные о характеристиках ГКВ имеются в небольшом количестве. Преимущественно они получены с использованием ветровых бассейнов и сильно отличаются друг от друга. В то же время, интерпретация данных самолетных и спутниковых радиолокационных, оптических и микроволновых радиометрических измерений требует детального знания параметров ГКВ.

При изучении собственного радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности особый интерес представляет случай, когда период неровностей сравним с

длинами принимаемых электромагнитных волн. В такой ситуации в радиоизлучении возникают особенности – так называемые "критические явления". В частности, для вертикальной поляризации принимаемого сигнала при наблюдении в плоскости, совпадающей с направлением волнового вектора неровностей, имеет место резонансное усиление коэффициента излучения поверхности. Здесь, следует отметить особое значение экспериментальных исследований (1976-1979 гг.), выполненных сотрудниками ИКИ РАН, с борта самолета-лаборатории при осуществлении круговых полетов в акваториях Баренцева, Белого, Каспийского, Охотского и Черного морей. Эти исследования послужили основой последующих экспериментальных и теоретических работ, направленных на изучение и объяснение обнаруженного эффекта азимутальной анизотропии теплового излучения взволнованной морской поверхности вообще, и «критических явлений», как одного из определяющих факторов ее существования, в частности. Следует отметить, что определяющий вклад в развитие теоретических основ данного явления был сделан В.С. Эткиным и Ю.А. Кравцовым с соавторами. В дальнейшем, теория явления была обобщена В.Г. Ирисовым на случай произвольной поляризации волны и произвольной плоскости падения относительно волнового вектора неровностей, т.е. задача была решена в общем трехмерном случае. Однако вопрос об экспериментальном подтверждении основных положений развитой теории был решен лишь в общем, качественном виде.

Полученные в представленных работах результаты легли в основу новой области применения микроволновой радиополяриметрии - радиоспектроскопических исследований ветрового волнения. В частности, Ю.Г. Трохимовский в своих работах показал высокую чувствительность азимутальной анизотропии теплового излучения морской поверхности к параметрам ГКВ и продемонстрировал возможность восстановления параметров спектра этого волнового интервала по данным угловых радиополяриметрических измерений. К сожалению, безвременная кончина ученого не позволила закончить ему работу над этой тематикой, оставив без ответа многие актуальные вопросы.

Все перечисленные факты, а также анализ работ Ю.Г. Трохимовского, развитием идей которого является настоящая диссертация, определили *основные задачи* данной работы:

1. Создание лабораторной физической установки для проведения высокоточных исследований рассеяния и излучения резонансного характера сложных шероховатых поверхностей.

2. Проведение лабораторного эксперимента по исследованию микроволнового излучения взволнованной водной поверхности на гравитационно-капиллярных масштабах.
3. Проведение модельных расчетов радиоярких контрастов в соответствии с теорией «критических явлений».
4. Сравнение результатов выполненных лабораторных исследований с модельными расчетами и представление заключения о применимости положений теории для описания собственного радиотеплового излучения шероховатой поверхности.
5. Разработка методики восстановления параметров спектра волнения в гравитационно-капиллярном интервале по данным угловых радиополяриметрических измерений на основе двухмасштабной модели волнения.
6. Проведение модельных расчетов, направленных на выяснение чувствительности разработанной методики к вариациям различных параметров, входящих в модель радиотеплового излучения.
7. Использование разработанной методики восстановления параметров спектра ГКВ при обработке данных натурных исследований и рассмотрение возможности ее применения в исследованиях морской поверхности.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие положения:

1. Результаты сравнения модельных расчетов с данными лабораторных исследований подтверждают высокую чувствительность модифицированных параметров Стокса теплового излучения периодически неровной водной поверхности к ее геометрии. Хорошее соответствие этих результатов позволяет использовать соотношения теории «критических явлений» в приближении метода малых возмущений для описания вклада коротковолновых компонент спектра волнения в итоговое значение радиотеплового излучения.
2. Разработанная методика анализа данных дистанционных угловых радиополяриметрических измерений позволяет восстанавливать параметры спектра гравитационно-капиллярных волн. При этом ошибка восстановления в основном определяется: точностью определения интегрального поглощения атмосферы; точностью проведения калибровок радиометрических приемников и их юстировки,

а также такими их характеристиками как значения кросс-поляризационных коэффициентов и коэффициент рассеяния антенных систем.

3. Результаты обработки данных натурального эксперимента CAPMOS'05 с использованием разработанной методики демонстрируют высокую степень зависимости спектра кривизны ГКВ от скорости приповерхностного ветра, достигающую своих максимальных значений в области спектрального максимума ($K \approx 7,0$ рад/см). Чувствительность восстановленных значений дисперсии уклонов поверхностных волн (по данным 8 мм радиометра) к вариациям скорости ветра начинает проявляться при $K \approx 1,5$ рад/см (указанное значение волнового числа K соответствует верхнему пределу интегрирования в соотношении для вычисления дисперсии). Максимум корреляции этих величин соответствует верхней границе диапазона рассматриваемых волновых чисел ($K \approx 15$ рад/см).

Научная новизна результатов

1. Впервые проведена серия лабораторных экспериментов по исследованию радиотеплового излучения на гравитационно-капиллярных масштабах в условиях детального контроля профиля волнения с использованием полупроводникового лазера.
2. Впервые разработана и применена в ходе комплексного натурального эксперимента методика восстановления параметров спектра ГКВ на основе данных угловых радиополяриметрических измерений.
3. Впервые разработан и реализован программный комплекс для восстановления параметров спектра ГКВ на основе данных многочастотных угловых радиополяриметрических измерений.
4. Впервые проведена серия модельных расчетов, направленных на выяснение чувствительности разработанной методики к вариациям различных параметров, входящих в модель радиотеплового излучения.
5. Впервые, на основе радиополяриметрических измерений, восстановлена динамика изменения параметров спектра в зависимости от скорости ветра при постоянном контроле состояния морской поверхности посредством проведения контактных измерений с использованием решетки струнных волнографов.

Научная и практическая ценность работы

Диссертация выполнялась в соответствии с научными планами ИКИ РАН, темы «Океан. Физические основы космического дистанционного зондирования поверхности океана в микроволновом диапазоне» (государственная регистрация № 01.20.0200163). Автор принимал участие в выполнении работ в рамках проектов: грант РФФИ № 00-05-64508; грант РФФИ № 01-05-06240 и № 02-05-06478 (в рамках гранта РФФИ № 00-05-64508); грант РФФИ № 01-02-16538; грант INTAS № 03-51-4789; грант РФФИ № 05-05-79113; грант РФФИ № 05-05-64451; грант РФФИ № 05-05-64235. Предложенный в диссертации подход к анализу микроволновых данных может быть применен для дополнения и развития существующих алгоритмов обработки данных дистанционного зондирования. Разработка методики дистанционного исследования характеристик пространственного спектра ГКВ в природных условиях позволит изучать влияние параметров ветрового потока, энергонесущих компонент волнения, поверхностно-активных веществ, турбулентности в приповерхностном слое на процесс развития волнения. Данные будут использованы для проверки моделей, в которых делаются разные предположения об основных источниках накачки и диссипации энергии в гравитационно-капиллярном интервале, а также других процессах, отражающих энерго- и массообмен в системе океан-атмосфера. Разработанный комплекс программ, будет использован для анализа состояния морской поверхности в режиме реального времени при проведении экспериментальных исследований в будущем. Научная ценность работы была отмечена Фондом содействия отечественной науке. Автор дважды (в 2004 и 2005 годах) становился лауреатом конкурса «Лучшие аспиранты РАН» по направлению «Физика и астрономия», проводимого этим фондом. Кроме этого, для выполнения научных исследований Департамент образования г. Москвы выделял автору в 2004 и 2005 годах гранты в рамках конкурса «Гранты Москвы» в области наук и технологий в сфере образования.

Личный вклад автора

Результаты, изложенные в диссертации, получены автором самостоятельно или на равных правах с соавторами. Автору принадлежат: разработка методики экспресс оценки параметров волнения в лабораторных условиях и создание соответствующей установки; модернизация измерительного комплекса для проведения лабораторных исследований; участие в лабораторных экспериментах по исследованию

радиотеплового излучения на гравитационно-капиллярных масштабах; усовершенствование программного комплекса по расчету радиотеплового излучения на гравитационно-капиллярных масштабах; проведение соответствующих модельных расчетов; разработка программного комплекса по расчету радиоярких контрастов для волн различных масштабов; разработка методики восстановления параметров спектра ГКВ; проведение модельных расчетов по оценке влияния различных параметров атмосферы, водной поверхности и измерительного оборудования как на результат расчета радиоярких контрастов водной поверхности, так и на результат восстановления параметров спектра ГКВ по данным угловых радиополяриметрических измерений; разработка программного комплекса для проведения анализа угловых зависимостей радиоярких контрастов с целью восстановления параметров спектра; участие в натуральных исследованиях и обработка полученных данных; участие в комплексном натурном эксперименте CAPMOS'05.

Апробация результатов

Результаты, вошедшие в диссертацию, получены автором в период с 1999 по 2006 год. Они докладывались на следующих отечественных и международных конференциях:

Всероссийская НТК «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы астрокосмическими средствами» (Муром, 2001); 5-ая Международная НТК «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'02 (Владимир, 2002); Всероссийская научная конференция «Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы» (Москва, 2002); НТК преподавателей, сотрудников и аспирантов факультета Радиофизики, электроники и медицинской техники (Владимир, 2003); 9-ая Всероссийская Научная Конференция Студентов-Физиков и молодых ученых ВНКСФ-9 (Красноярск, 2003); Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2003); 8-th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing Application (Rome, Italy, 2004); Конференция молодых ученых, посвященная Дню космонавтики (Москва, 2004); Вторая открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2005); Третья открытая Всероссийская конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, 2006); 3-я Конференция молодых ученых, посвященная

Дню космонавтики (Москва, 2006); VII-ая Международная научно-техническая конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (Владимир, 2006).

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 20 печатных работах, перечисленных в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений и библиографии. В ней содержится 184 страниц, в том числе, 83 рисунка, 31 таблица. Библиография включает 215 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава носит обзорный характер.

Для полной характеристики квазистационарного волнения необходимо знать бесконечномерный закон распределения аппликат волновой поверхности, однако для практических целей обычно используются более простые вероятностные характеристики, описывающие квазистационарное волнение лишь приближенно. К таким характеристикам относятся двумерный спектр возвышений морской поверхности и функции распределения элементов волн. В данной главе приведены основные соотношения, используемые в настоящее время для описания пространственно-временного распределения ветрового волнения на поверхности океана в приближении его локальной квазистационарности. Также представлены формулы взаимного преобразования наиболее используемых характеристик ветрового волнения (табл. 1).

Проведенный анализ теоретических и экспериментальных работ, посвященных вопросу дистанционного определения параметров спектра гравитационно-капиллярных волн, позволил сделать следующие выводы:

- Исследования в оптическом и микроволновом диапазонах обладают высокой чувствительностью к геометрии подстилающей поверхности, что делает возможным их использование для изучения ветрового волнения.

Соотношение между основными спектральными характеристиками волнового процесса
(по материалам работы [Elfouhaily et al., 1997])

Название функции	Обозначение	Единицы измерения	Направленность
Спектр возвышений	$S(K)$	м ³ /рад	ненаправленные
Спектр уклонов	$P(K) = K^2 \cdot S(K)$	м*рад	
Спектр кривизны	$B(K) = K^3 \cdot S(K)$	рад ²	
Спектр возвышений	$S(K_x, K_y), S(K, \varphi)$	м ⁴ /рад ²	направленные
Спектр уклонов вдоль и поперек генерального направления распространения волн	$P_x = K_x^2 \cdot S(K_x, K_y)$	м ²	
	$P_y = K_y^2 \cdot S(K_x, K_y)$	м ²	
Спектр кривизны	$B(K_x, K_y) = K^4 \cdot S(K_x, K_y)$	рад ²	

- Полуэмпирические модели волнения, составленные на основе результатов исследований в одном из указанных частотных диапазонов (видимый или микроволновый), хорошо объясняют экспериментальные зависимости, полученные тем же самым методом. В общем случае, использование этих моделей при переходе к другому методу исследований не всегда объясняет наблюдаемые результаты.
- С этой точки зрения, преимуществом обладают полуэмпирические модели, представляющие собой обобщение имеющихся к настоящему времени результатов экспериментальных исследований, полученных разными методами.
- При этом следует отметить большую роль лабораторных исследований, которые являются эффективным способом доказательства основных концепций, обнаружения специфических взаимодействий, опробования методик и т.п.
- Задача экспериментального подтверждения теории «критических явлений», лежащей в основе радиополяриметрических методов определения параметров спектра ГКВ, решена только в качественном виде. Дальнейшее развитие радиополяриметрического метода требует ее количественного решения.
- Результаты сравнения данных модельных расчетов радиояркой температуры, выполненных в соответствии с двухмасштабной моделью волнения, с различными экспериментальными данными, позволяет сделать вывод о правомерности

использования этой модели при описании теплового излучения морской поверхности в нештормовых условиях.

- Исследования параметров морского волнения с использованием радиометров-поляриметров в настоящее время ограничиваются результатами работ Трохимовского Ю.Г. и Ирисова В.Г. В указанных печатных работах отсутствуют данные о точности и чувствительности методов восстановления спектра ветровых волн, основанных на радиополяриметрических измерениях, к вариациям параметров морской поверхности и приводного слоя атмосферы, а так же характеристик измерительного оборудования.
- В рассмотренных работах отсутствует информация о динамике изменения спектра волнения, восстановленного с использованием данных радиометрических исследований, в условиях изменяющейся скорости приповерхностного ветра, подтвержденных синхронными измерениями контактным методом.

Во второй главе представлены результаты лабораторных исследований собственного радиотеплового излучения периодически неровной водной поверхности и их сравнения с данными модельных расчетов, выполненных в соответствии с теорией «критических явлений» в приближении метода малых возмущений (ММВ).

Тепловое радиоизлучение неровной водной поверхности в том случае, когда характерные размеры неровностей близки к длине волны излучения, обладает рядом специфических особенностей. В частности, при некоторых условиях, определяемых выражением (1), возникает резонансное увеличение коэффициента излучения поверхности. Причем, если на горизонтальной поляризации на резонансных длинах волн отмечаются относительно незначительные скачки излучательной способности $\delta(\lambda/\Lambda, \theta, \varphi)$, то на вертикальной поляризации отмечаются резкие и высокие пики в излучении (рис. 1).

$$\rho^2 + 2\rho \sin \theta \cos \varphi - \cos^2 \theta = 0, \text{ где } \rho = n \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

где: λ - длина волны принимаемого электромагнитного излучения; Λ - период поверхностной волны; θ и φ - соответственно вертикальный и азимутальный углы наблюдения.

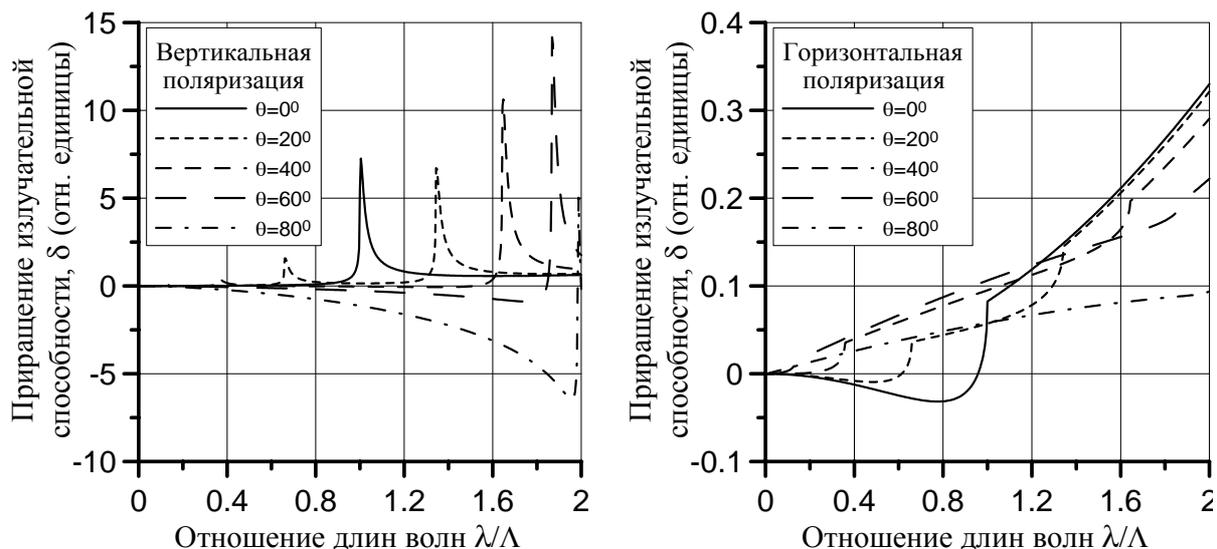


Рис. 1. Приращение излучательной способности на вертикальной и горизонтальной поляризации в зависимости от отношения длин волн для различных углов зондирования ($\varphi=0^\circ$)

В данной главе приведены основные соотношения теории «критических явлений» и решение задачи изменения излучательной способности водной поверхности при наличии периодических неровностей в приближении ММВ. На основе представленных соотношений разработан комплекс программ, позволяющий определять радиояркие контрасты водной поверхности для произвольных углов зондирования в присутствии систем волн с известными параметрами.

В рамках работы над диссертацией, разработана и создана лабораторная физическая установка для проведения высокоточных исследований рассеяния и излучения резонансного характера сложных шероховатых поверхностей. Конструкция установки позволяет осуществлять измерения радиофизических характеристик водной поверхности в широком диапазоне углов зондирования, как по азимуту (от 0 до 360 градусов), так и по углу места (от 10 до 70 градусов). Для снижения влияния на результаты исследований подсвета окружающих предметов и элементов конструкций в схеме установке предусмотрена система переотражателей.

Проведена серия лабораторных экспериментов по исследованию радиотеплового излучения водной поверхности на гравитационно-капиллярных масштабах в условиях постоянного контроля профиля волнения. В качестве объекта исследований использована диэлектрическая ванна с водой, на поверхности которой создавалась система периодических возвышений (с использованием рамки с нитями).

Преимуществом такого типа шероховатой («замороженной») поверхности перед генерируемыми волнопродуктором или ветровым потоком систем волн, является постоянство ее структуры и возможность точного измерения профиля неровностей. В рамках выполненных исследований, разработана методика контроля профиля неровностей на водной поверхности с использованием полупроводникового лазера. Основой предложенной методики является определение координат единичных векторов, задающих направление падающего и отраженного лучей лазера при сканировании в направлении, перпендикулярном направлению натяжения нитей. Периодические неровности с периодом 12 мм и амплитудой 0,6 мм привели в описанном эксперименте к увеличению радиояростной температуры на 9 К (рис. 2).

Результаты сравнения модельных расчетов, выполненных в соответствии с представленными соотношениями теории «критических явлений», с данными лабораторных исследований подтверждают, во-первых, высокую чувствительность радиояростных контрастов периодически неровной водной поверхности к ее геометрии, а во-вторых, служат убедительным свидетельством того, что короткие гравитационно-капиллярные волны играют определяющую роль в формировании теплового радиоизлучения взволнованной водной поверхности. Хорошее совпадение этих результатов позволяет использовать соотношения теории для описания вклада коротковолновых компонент спектра в итоговое значение радиояростной температуры водной поверхности, обусловленной присутствием волн различных масштабов.

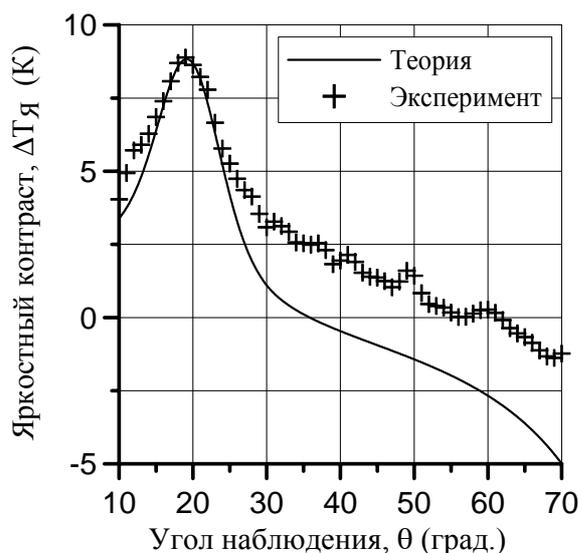


Рис. 2. Зависимость радиояростного контраста возмущенной поверхности от угла зондирования

Третья глава посвящена разработке алгоритма восстановления параметров спектра ГКВ по данным угловых радиополяриметрических измерений. Исходя из результатов анализа литературы и лабораторных исследований, процесс разработки методики восстановления параметров спектра ГКВ был разделен на следующие этапы:

- Разделение различных параметров водной поверхности, атмосферы, измерительного оборудования по их влиянию на регистрируемые значения радиояркостной температуры взволнованной водной поверхности.
- Разработка алгоритма восстановления параметров спектра ГКВ на основе данных угловых радиополяриметрических измерений.
- Оценка степени влияния каждого из параметров первого пункта на результат восстановления характеристик ветрового волнения и разработка требований, предъявляемых к методике проведения измерений и характеристикам используемых радиометрических приемников.

Расчет радиояркостных контрастов $\Delta T_{Я}(\theta)$, определяемых как разность радиояркостной температуры взволнованной и гладкой водной поверхности $T_{Я_ГЛ}(\theta)$ при фиксированных значениях температуры, солёности и состояния атмосферы, производился с учетом вклада всего спектра поверхностных волн, пены и модуляции переотраженного излучения атмосферы. Вычисления выполнены в рамках двухмасштабной модели волнения. Учет длинных волн ($k \gg K$, где $k = 2\pi/\lambda$ и $K = 2\pi/\Lambda$) произведен по методу Кирхгофа в приближении геометрической оптики (3), а коротковолновые компоненты учтены ($K > K_{дл}, K_{дл} = 0,05 k$) в соответствии с теорией «критических явлений» в приближении ММВ (5). Важно, что указанные соотношения, как и используемые в методике восстановления параметров спектра ГКВ, относятся к усредненным по азимутальным направлениям яркостным контрастам.

$$\Delta T_{Я_МОД} = \Delta T_{Я_КОР} + \Delta T_{Я_ДЛ} \quad (2)$$

$$\Delta T_{Я_ДЛ}(\theta) = \iint P_{\theta}(\varphi_x, \varphi_y) \cdot (T_B(1 - |R|^2) + |R|^2 \cdot T_{П}(\theta, \theta_{Л})) d\varphi_x d\varphi_y - T_{Я_ГЛ}(\theta) \quad (3)$$

где φ_x и φ_y - уклоны крупных волн; $P_{\theta}(\varphi_x, \varphi_y)$ - функция распределение вероятностей уклонов при наблюдении под углом θ , T_B - физическая температура поверхности воды; $R = R(\theta_{Л})$ - локальный коэффициент Френеля; $T_{П}$ - яркостная температура излучения подсвета, которая равна яркостной температуре атмосферы $T_{Я_АТМ}$ или излучению поверхности в зависимости от угла наблюдения и локальных уклонов φ_x и

φ_y ; $\theta_{л}$ - локальный угол падения. Интегрирование проводится по всем видимым участкам поверхности. Связь между локальным углом падения $\theta_{л}$ и углами θ , φ_x и φ_y легко находится из простого геометрического рассмотрения. Величины R , $T_{л}$ и $T_{я_гл}(\theta)$ меняются в зависимости от выбора поляризации. Важно, что так как распределение уклонов близко к Гауссовой функции, то естественно использовать дисперсию уклонов σ_0^2 (4) в качестве единственного параметра, описывающего изменение радиояркости за счет крупных волн, длины которых много больше длины электромагнитного излучения. Иными словами - $\Delta T_{я_дл} = f(\sigma_0^2)$, где:

$$\sigma_0^2 = 2\pi \int_0^{K_{\text{мин}}} K^{-1} B(K) dK. \quad (4)$$

Вклад коротковолновых компонент спектра, может быть определен:

$$\Delta T_{я_кор}(\theta) = 2\pi \int_{K_{\text{дл}}}^{\infty} B(K) \cdot D(K) K dK, \quad (5)$$

где $D(K)$ - функция, пропорциональная приращению излучательной способности, имеющая смысл яркостного контраста, усредненного по всем азимутальным направлениям и обусловленного присутствием данной гармоники в спектре поверхностного волнения; $B(K)$ - спектр кривизны, усредненный по всем азимутальным направлениям

В данной главе представлены результаты анализа характера влияния различных параметров атмосферы и водной поверхности на расчетные значения радиояркостных контрастов. Как показали выполненные исследования, значительное влияние на регистрируемые значения радиояркостных контрастов оказывают: ошибки определения интегрального поглощения атмосферы; ошибки определения калибровочных коэффициентов радиометрических приемников; ошибки юстировки антенных систем радиометрических приемников; реальные характеристики антенных систем; присутствие кросс-поляризационных эффектов. По сравнению с перечисленными факторами, влиянием вариаций температур воды, воздуха и значений солености можно пренебречь.

Расчетные значения радиояркостных контрастов, в силу резонансного характера радиотеплового излучения на волновых числах, близких к длине волны используемых радиометров, проявляют сильную зависимость от формы спектра поверхностного

волнения. При этом характер вносимых изменений определяется соотношением длин волн поверхностной гармоника и рабочей длины волны выбранного радиометрического канала. «Уникальный» характер функции $\Delta T_{\theta}(\theta)$, соответствующей конкретному набору параметров водной поверхности и атмосферы, позволяет решить задачу восстановления параметров спектра ГКВ путем подбора таких значений спектра кривизны $B(K)$ и дисперсии уклонов крупных волн σ_0^2 , которые минимизируют расхождение экспериментально измеренных и модельных значений $\Delta T_{\theta}(\theta)$. Эти положения легли в основу разработанного метода восстановления параметров ГКВ по данным угловых радиополяриметрических измерений. Схема алгоритма программного комплекса, реализующего представленную методику, приведена на рис. 3. Диапазон волновых чисел $[K_{\text{МИН}}, K_{\text{МАКС}}]$, в котором могут быть восстановлены параметры спектра, определяется максимальным и минимальным значениями частот используемых радиометрических каналов ($K_{\text{МИН}}=0,05 k_{0\text{МИН}}$, $K_{\text{МАКС}}=2,0 k_{0\text{МАКС}}$; $k_{0\text{МИН}}$ и $k_{0\text{МАКС}}$ суть минимальное и максимальное волновое число (k_0) принимаемого излучения для всего набора радиометрических каналов). Кроме расширения диапазона волновых чисел, использование данных многочастотных измерений позволяет повысить достоверность восстанавливаемых значений и минимизировать влияние ошибок различного характера.

На примере модельных расчетов показано, что разработанная методика восстановления параметров спектра ГКВ, в отсутствие влияния вариаций входных данных позволяет восстанавливать значения спектра кривизны $B(K)$, функции дисперсии уклонов $\sigma^2(K)$ и дисперсии уклонов крупных волн σ_0^2 с точностью не хуже 7,0%, 1,0% и 15,0% соответственно (рис. 4).

Результаты электродинамического моделирования, позволили произвести оценку влияния вариаций параметров, входящих в расчет, на точность восстановления параметров спектра. На основе анализа выработана система требований к измерительному оборудованию и методике проведения измерений, которые направлены на повышение качества восстановления параметров морского волнения (табл. 2).

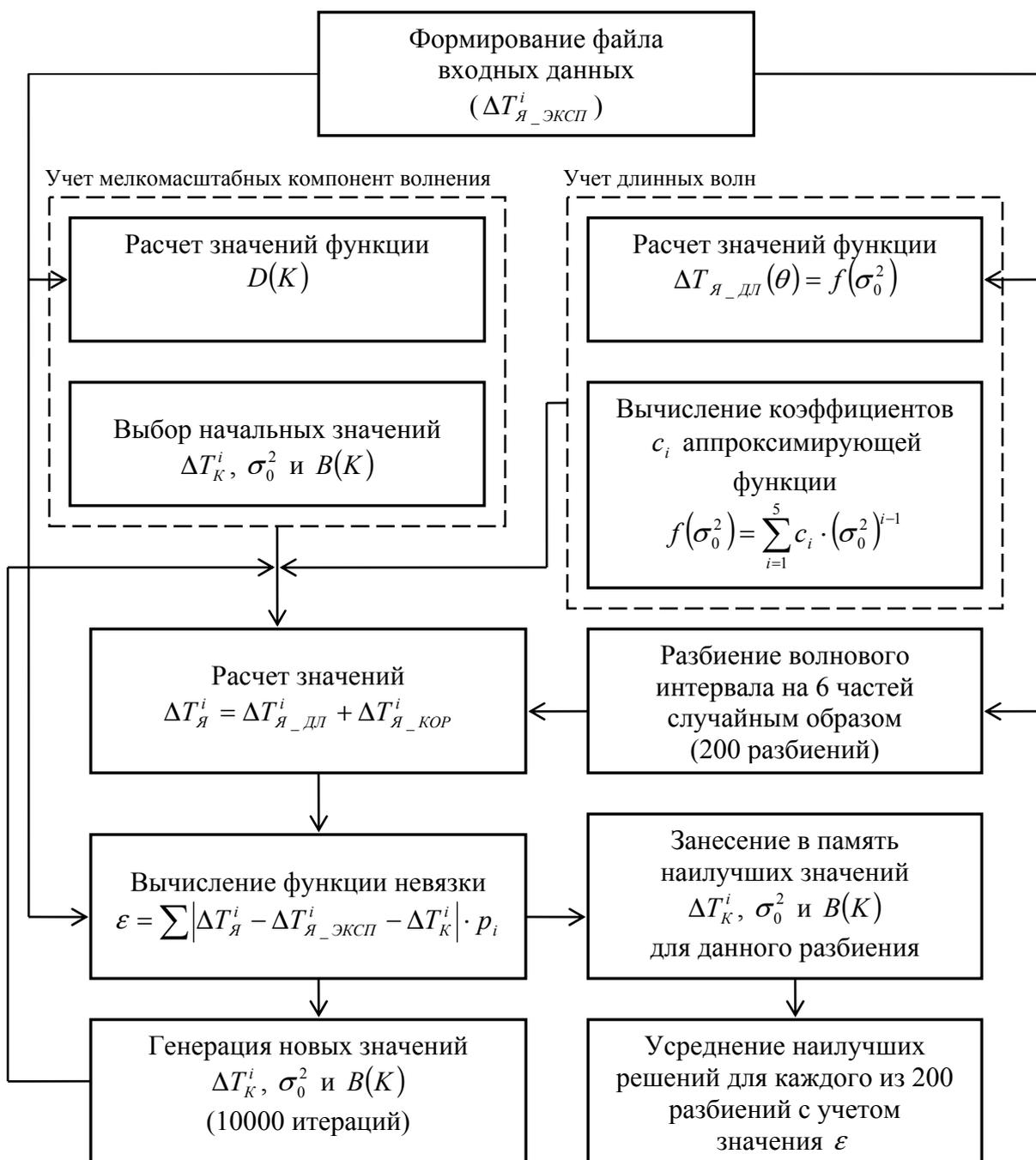


Рис. 3. Алгоритм восстановления параметров спектра

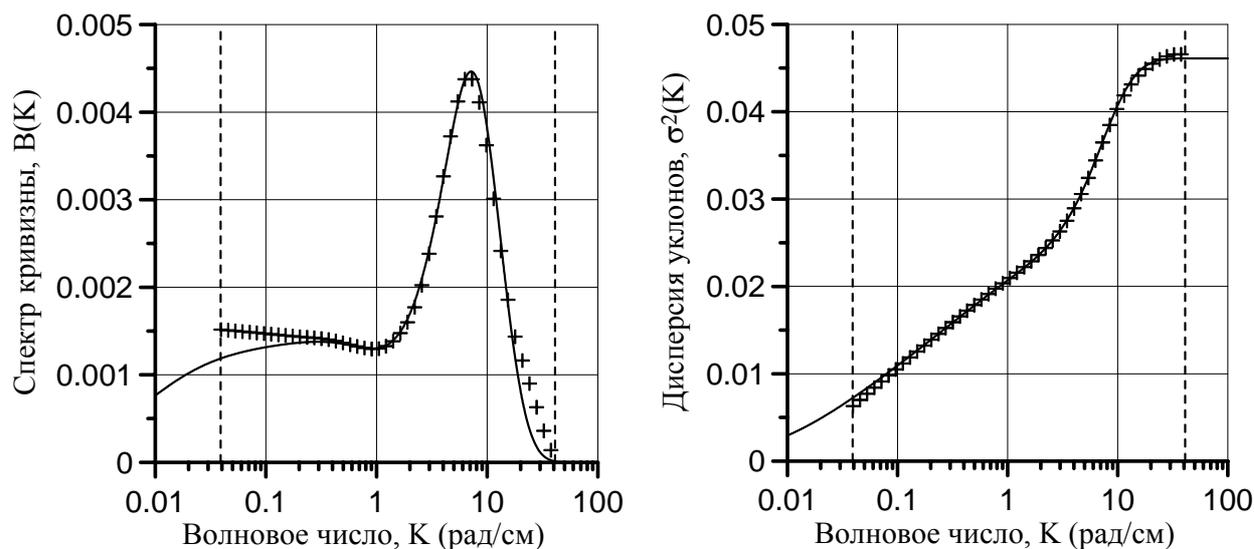


Рис. 4. Спектр $B(K)$ (слева) и функция дисперсии уклонов $\sigma^2(K)$ (справа), восстановленные (крестики) в соответствии с разработанной методикой при использовании данных набора радиометров: 8 мм (горизонтальная поляризация), 3 мм (вертикальная поляризация) и 8 см (вертикальная поляризация). Случай отсутствия вариаций входных параметров. Сплошная линия – исходные значения $B(K)$ и $\sigma^2(K)$

Таблица 2

Требования, предъявляемые к измерительному оборудованию

Параметр/измеряемая величина	Значение/Точность определения
Температура водной поверхности	не хуже $\pm 0,5^\circ\text{C}$
Температура атмосферы и АЧТ	не хуже $\pm 0,5^\circ\text{C}$
Соленость	не хуже $\pm 1,0\%$
Интегральное поглощение атмосферы	не хуже $\pm 2,5\%$
Точность юстировки антенн радиометров	не хуже $\pm 0,2^\circ$
Определение значений калибровочных коэффициентов	не хуже $\pm 1,5\%$
Уровень кросс-поляризации	не хуже 17,0 дБ
Коэффициент рассеяния антенных систем	не более 0,1
Чувствительность радиометра	не хуже 0,1 К

В четвертой главе представлены результаты восстановления параметров спектра гравитационно-капиллярных волн на основе данных натурального эксперимента CAPMOS'05 (Combined Active/Passive Microwave Measurements of Wind Waves for Global Ocean Salinity Monitoring). Приоритетными целями этого международного научного проекта являлись: исследование влияния температуры, солёности и волнения на характеристики излучаемых и рассеиваемых морской поверхностью электромагнитных волн, а также развитие средств и методов дистанционного зондирования Океана на основе полученных данных.

Измерения были выполнены с научно-исследовательской океанографической платформы, расположенной у южного берега Крыма вблизи п. Кацевели, в период с 1 по 21 июня 2005 г. Географическое расположение платформы таково, что при господствующих ветрах восточного и западного направления, тем более при южном ветре со стороны открытого моря, обеспечивается достаточный разгон ветровых волн, что позволяет относить волновые измерения к условиям глубокой воды и развитого волнения. Измерения радиотеплового излучения взволнованной водной поверхности производились непрерывно 24 часа в сутки с регистрацией экспериментальных данных в цифровой форме на персональных компьютерах и сопровождалась метеорологическими измерениями. Измерения скорости и направления ветра (и температуры атмосферы) проводились с помощью акустических анемометров, входящих в состав метеокомплексов МК-15, установленных на высоте 1,5 и 21,5 м над уровнем морской поверхности.

Представленные в диссертации результаты относятся к периоду 8-9 июня и получены с помощью радиометра-поляриметра 8 мм (горизонтальная и вертикальная поляризации). С целью обеспечения требуемого качества входных данных, предъявляемого разработанной методикой восстановления параметров спектра, измерения производились на 6 азимутальных углах и в диапазоне вертикальных углов наблюдения от 10 до 170 градусов от надира. Для этого была задействована автоматическая сканирующая платформа. По полученным данным, после соответствующей обработки (калибровки радиометрических каналов, отсеивания ошибочных точек и т.п.) и усреднения по азимутальным направлениям, с использованием представленной методики вычислялись параметры спектра ГКВ.

Как было показано в третьей главе, использование данных радиометрических измерений на длине волны $\lambda = 0,8$ см ($k = 7,85$ рад/см), позволяет восстанавливать

значения спектра кривизны $B(K)$ и функции дисперсии уклонов $\sigma^2(K)$ в диапазоне волновых чисел $[0,39; 15,7]$ рад/см, а значение дисперсии уклонов крупных волн σ_0^2 - для компонент спектра $K < 0,39$ рад/см. Пример восстановленных характеристик спектра ГКВ, полученных на основе данных 25-минутных измерений, представлен на рис. 5. Для сравнения, на том же рисунке представлены аналогичные зависимости, рассчитанные в соответствии с моделями [Apel, 1994] (A), [Elfouhaily et al., 1997] (E) и [Romasier et al., 1997] (R) для скорости ветра 4,15 м/с (соответствующей данному временному отрезку). Из графиков видно, что восстановленные значения $B(K)$ значительно превышают данные модельных расчетов, выполненных по любой из моделей. Найденная функция $B(K)$ имеет ярко выраженный максимум на $K \approx 7$ рад/см, в то время как аналогичный характер кривой наблюдается лишь для модели (A) при скорости ветра 8,5 м/с. Следует отметить, что восстановленные значения спектра кривизны для всего диапазона скоростей ветра имеют аналогичный характер (максимум на $K \approx 7$ рад/см), при этом рост скорости ветра сопровождается ростом амплитуды $B(K)$.

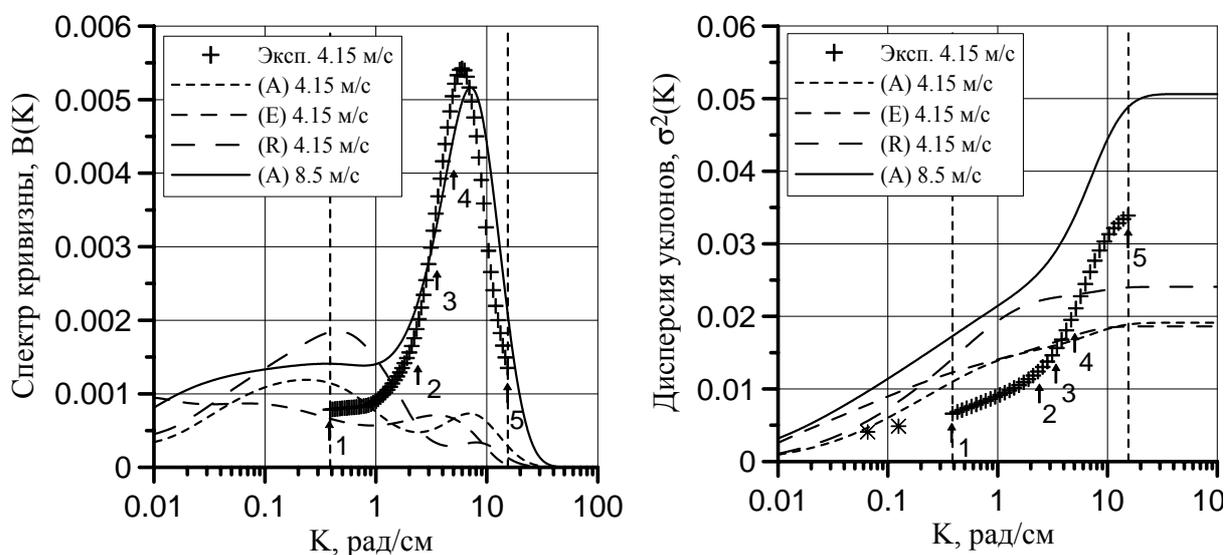


Рис. 5. Восстановленные значения спектра кривизны $B(K)$ и зависимости дисперсии уклонов $\sigma^2(K)$ в сравнении с моделями (A), (E) и (R). Звездочки – значения дисперсии уклонов волн для всех $K < 0,125$ и $K < 0,066$ рад/см, измеренные с помощью струнного волнографа. Цифрами обозначено расположение в спектре тех волновых чисел, для которых на рис. 6 и рис. 7 построены временные зависимости

На фоне значительной переоценки $B(K)$, зависимость $\sigma^2(K)$ характеризуется более низкими значениями относительно модельных. Так, для нижней границы интервала волновых чисел, в котором происходит решение обратной задачи, восстановленное σ_0^2 в 2 раза меньше модельных значений.

Проведение радиополяриметрических измерений сопровождалось данными решетки струнного волнографа. Его описание и методика обработки получаемых результатов представлены в настоящей главе. Геометрия расположения струн позволяла определять мгновенные значения уклонов морской поверхности, соответствующих всем волновым компонентам, удовлетворявшим условиям $K < 0,125$ или $K < 0,066$ рад/см. Данные волнографа, отчасти, служат подтверждением достоверности результатов восстановления параметров спектра ГКВ. Так, на рис. 5 обозначены σ_0^2 , полученные посредством этого устройства (звездочки). Ввиду гладкости функции $\sigma^2(K)$ в данном волновом интервале, экстраполирование экспериментальной кривой $\sigma^2(K)$ в область $K = 0,066$ рад/см наилучшим образом ложится на соответствующие данные волнографа.

Анализ результатов контактных измерений, полученных посредством волнографа, позволяет сделать следующие выводы:

- 1) В случае не усредненных по азимутальному углу значений уклонов, функция их распределения (для $K < 0,125$ рад/см) не может быть описана нормальным законом.
- 2) Максимум этой функции смещен в сторону генерального направления распространения волн.
- 3) Распределение уклонов, усредненных по всем направлениям, близко к гамма-распределению или χ -распределению случайных величин.

На графиках (рис. 6 и рис. 7) представлена динамика изменения восстановленных параметров спектра ГКВ в сравнении со скоростью приповерхностного ветра. Найденные значения спектра кривизны ГКВ $B(K)$ проявляют высокую степень зависимости от скорости приповерхностного ветра, достигающую своих максимальных значений в области спектрального максимума ($K \approx 7,0$ рад/см). Также из представленных зависимостей видно, что чувствительность восстановленных значений дисперсии уклонов поверхностных волн к вариациям скорости ветра начинает проявляться при $K \approx 1,5$ рад/см (указанное значение волнового числа K соответствует верхнему пределу интегрирования в соотношении

для вычисления дисперсии). Максимум корреляции этих величин соответствует верхней границе диапазона рассматриваемых волновых чисел $K \approx 15$ рад/см (при использовании данных 8 мм радиометра).

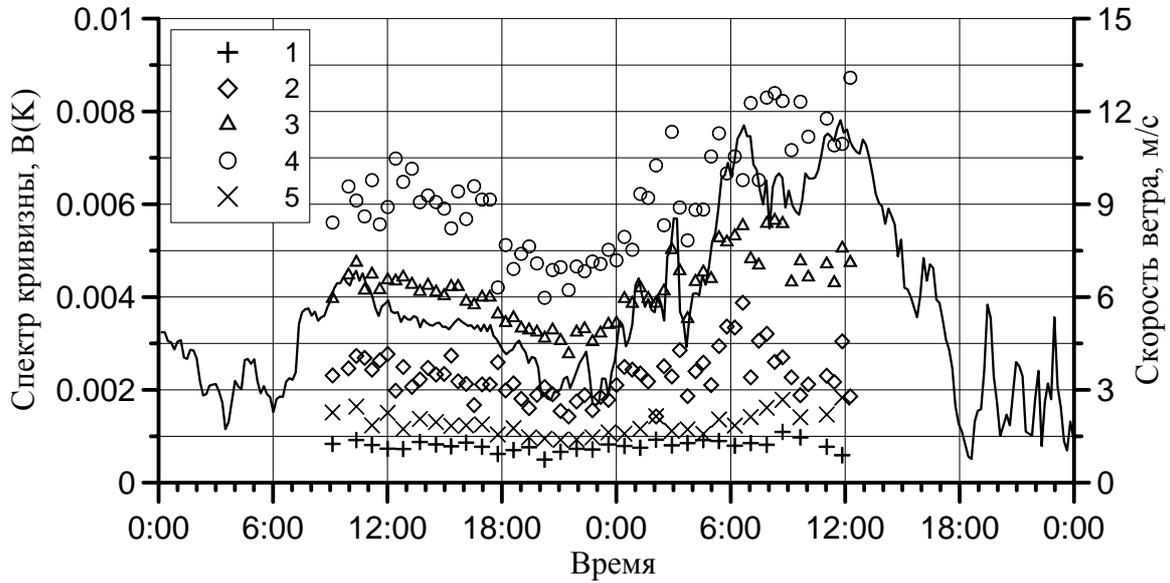


Рис. 6. Временные зависимости восстановленных значений спектра кривизны $B(K)$, рассчитанных для различных волновых чисел. Цифры соответствуют волновым числам, расположение которых в спектре показано на рис. 5. Сплошная линия – скорость приповерхностного ветра

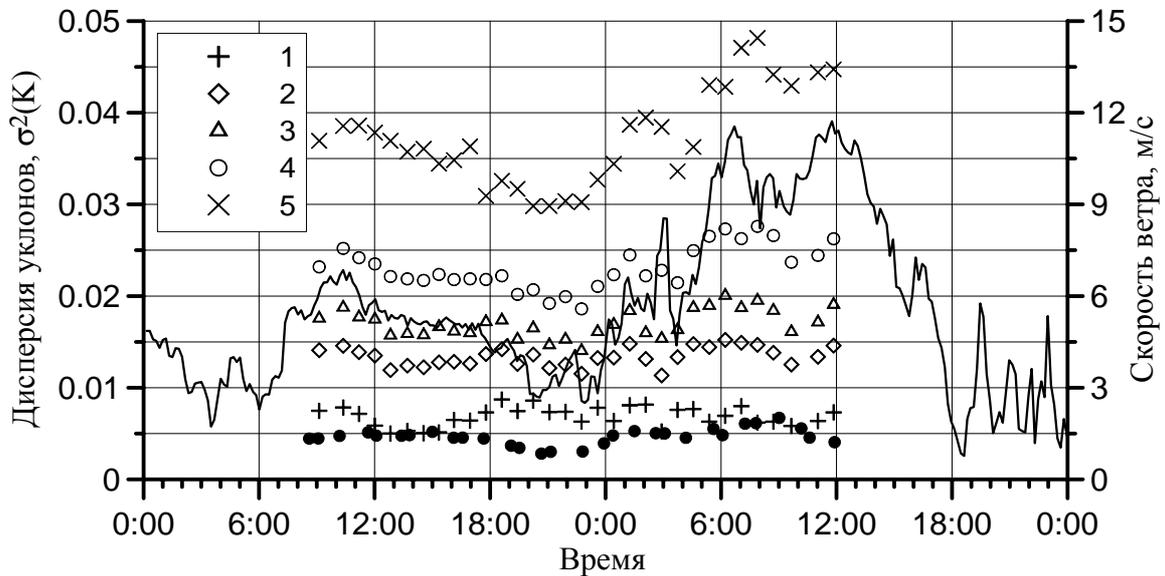


Рис. 7. Временные зависимости восстановленных значений функции дисперсии уклонов $\sigma^2(K)$, рассчитанных для различных волновых чисел. Цифры соответствуют волновым числам, расположение которых в спектре показано на рис. 5. Сплошная линия – скорость приповерхностного ветра. Точками обозначены показания струнного волнографа ($K < 0,125$ рад/см)

Заключение содержит основные результаты работы:

1. Разработана и создана лабораторная физическая установка для проведения высокоточных исследований рассеяния и излучения резонансного характера сложных шероховатых поверхностей. Конструкция установки позволяет осуществлять измерения радиофизических характеристик водной поверхности в широком диапазоне углов зондирования, как по азимуту, так и по углу места. Для снижения влияния на результаты исследований подсвета окружающих предметов и элементов конструкций в схеме установке предусмотрена система переотражателей.
2. Проведена серия лабораторных экспериментов по исследованию радиотеплового излучения водной поверхности на гравитационно-капиллярных масштабах в условиях постоянного контроля профиля волнения. В качестве объекта исследований использована диэлектрическая ванна с водой, на поверхности которой создавалась система периодических возвышений (с использованием рамки с нитями). Преимуществом такого типа шероховатой («замороженной») поверхности перед генерируемыми волнопродуктором или ветровым потоком систем волн, является постоянство ее структуры и возможность точного измерения профиля неровностей. В рамках выполненных исследований, разработана методика контроля профиля неровностей на водной поверхности с использованием полупроводникового лазера. Основой предложенной методики является определение координат единичных векторов, задающих направление падающего и отраженного лучей лазера при сканировании в направлении, перпендикулярном направлению натяжения нитей. Периодические неровности с периодом 12 мм и амплитудой 0,6 мм привели в описанном эксперименте к увеличению радиояркой температуры на 9 К. Полученные угловые зависимости радиояркой температуры служат убедительным свидетельством того, что короткие гравитационно-капиллярные волны играют определяющую роль в формировании теплового радиоизлучения взволнованной водной поверхности и дают достаточно оснований полагать, что именно эти короткие гравитационно-капиллярные волны служат основной причиной существования азимутальной анизотропии поляризационных параметров теплового радиоизлучения взволнованной морской поверхности.
3. Разработан и реализован программный комплекс, позволивший произвести электродинамическое моделирование радиоярких контрастов,

обусловленных коротковолновыми компонентами спектра ветрового волнения, в соответствии с теорией «критических явлений». Центральный модуль разработанного программного комплекса используется для решения задачи о падении пробной электромагнитной волны на неровную периодическую поверхность раздела двух сред. Для решения используется метод малых возмущений, причем расчет ведется до величин второго порядка малости. Модульный тип построения программного комплекса позволяет изменять: модель радиотеплового излучения атмосферы, модель диэлектрической проницаемости воды, форму ДН используемых антенных систем, метод их учета и т.д.

4. Выполнен сравнительный анализ экспериментальных и теоретических данных, результаты которого свидетельствуют о возможности использования приведенной методики учета (и разработанного программного комплекса) коротковолновых составляющих при расчете радиояркостной температуры водной поверхности, обусловленной присутствием волн различных масштабов. В частности, теоретически предсказанный резонансный максимум зависимости $\Delta T_{\text{я}}(\theta)$ (для вертикальной поляризации принимаемого излучения), соответствующий условиям проведения лабораторных исследований, в точности совпал с полученным экспериментально как по углу, так и по амплитуде.
5. Разработана методика восстановления параметров спектра волнения в гравитационно-капиллярном интервале по данным угловых радиополяриметрических измерений на основе двухмасштабной модели волнения. «Уникальный» (за счет присутствия резонансных эффектов) характер функции $\Delta T_{\text{я}}(\theta)$, соответствующей конкретному набору параметров водной поверхности и атмосферы, позволяет решить задачу восстановления параметров спектра ГКВ путем подбора таких значений спектра кривизны $B(K)$, дисперсии уклонов крупных волн σ_0^2 и ошибок калибровки по постоянному уровню ΔT_K для каждого из используемых радиометрических каналов, которые минимизируют расхождения экспериментально измеренных зависимостей $\Delta T_{\text{я}}(\theta)$ и вычисленных по подобранным значениям искомых величин. Методика предполагает использование численного метода решения обратной задачи, в качестве которого используется метод последовательных приближений. В соответствии с представленным алгоритмом, диапазон волновых чисел, в

- котором осуществляется решение обратной задачи, определяется по известным рабочим длинам волн используемых радиометрических приемников.
6. Разработан и реализован программный комплекс для восстановления параметров спектра ГКВ на основе данных многочастотных угловых радиополяриметрических измерений. Функционально, разработанный программный комплекс состоит из трех модулей: учет вклада длинноволновых компонент спектра по методу Кирхгофа с учетом переотраженного излучения атмосферы; оценка влияния коротковолновых гармоник в соответствии с теорией «критических явлений» в приближении метода малых возмущений и модуль поиска решения ОЗ. На примере показано, что разработанная методика восстановления параметров спектра ГКВ, реализованная в виде программного комплекса, в отсутствие влияния вариаций входных данных позволяет восстанавливать значения $B(K)$, $\sigma^2(K)$ и σ_0^2 с точностью не хуже 7,0%, 1,0% и 15,0% соответственно.
 7. Сформулированы требования, предъявляемые к измерительному оборудованию, а также к алгоритму проведения экспериментальных исследований на основе выполненных модельных расчетов, направленных на выяснение чувствительности разработанной методики к вариациям различных параметров, входящих в модель радиотеплового излучения. Также показано, что разработанный алгоритм восстановления параметров спектра ГКВ является наиболее чувствительным к: точности определения угла визирования и юстировки радиометрических приемников; точности выполнения калибровок радиометрических каналов; точности определения параметров атмосферы по данным натурных измерений; а также таким параметрам измерительного оборудования как присутствие кросс-поляризационных эффектов и формы ДН используемых антенн.
 8. На основе данных международного натурального эксперимента CAPMOS'05 восстановлена динамика изменения параметров спектра ГКВ в зависимости от скорости ветра. Восстановленные по представленной методике значения дисперсии уклонов $\sigma^2(K)$ и спектра кривизны $B(K)$ демонстрируют зависимость от величины скорости приповерхностного ветра. Максимум зависимости спектра кривизны ГКВ от скорости приповерхностного ветра наблюдается для области волновых чисел, соответствующей спектральному

максимуму ($K \approx 7,0$ рад/см). Чувствительность восстановленных значений дисперсии уклонов поверхностных волн к вариациям скорости ветра начинает проявляться при $K \approx 1,5$ рад/см (указанное значение волнового числа K соответствует верхнему пределу интегрирования в соотношении для вычисления дисперсии). Максимум корреляции этих величин соответствует верхней границе диапазона рассматриваемых волновых чисел ($K \approx 15$ рад/см). Представленные результаты свидетельствуют о возможности применения разработанной методики восстановления параметров спектра ГКВ для мониторинга состояния водной поверхности, а в дальнейшем, ее использования для построения ветровых зависимостей, уточнения существующих или создания новых моделей волнения, а также для объяснения физических процессов на границе раздела океан – атмосфера.

В **Приложении 1** представлены результаты модельных расчетов собственного теплового излучения взволнованной морской поверхности в условиях вариации различных параметров водной поверхности, атмосферы и измерительного оборудования.

Приложение 2 содержит результаты модельных расчетов по оценке влияния различных параметров водной поверхности, атмосферы и измерительного оборудования на результат восстановления параметров спектра ГКВ.

Полученные в Приложении 1 и Приложении 2 результаты являются подтверждением основных выводов, представленных в Главе 3.

В **Приложении 3** приведен алгоритм учета характеристик антенных систем радиометрических приемников, использование которого, в дальнейшем, позволит повысить точность разработанного алгоритма восстановления параметров спектра ГКВ.

Публикации по теме диссертации

1. *Кузьмин А.В., Никитин О.Р., Поспелов М.Н., Садовский И.Н., Трохимовский Ю.Г.* Экспериментальная установка для определения профиля взволнованной водной поверхности в лабораторных условиях // 5-я Международ. научно-технич. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'02: Тез. докл. Владимир, 2002. С. 215–216.

2. Кузьмин А.В., Никитин О.Р., Поспелов М.Н., Садовский И.Н., Трохимовский Ю.Г. Исследование радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности // 5-я Международ. научно-технич. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» ФРЭМЭ'02: Тез. докл. Владимир, 2002. С. 217-218.
3. Кузьмин А.В., Поспелов М.Н., Ретина И.А., Садовский И.Н., Смирнов М.Т. Предварительные результаты комплексного радиофизического эксперимента на Черном море «САРМОС'05» // 3-я открытая Всероссийская конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2005. С. 149.
4. Кузьмин А.В., Поспелов М.Н., Садовский И.Н. Микроволновые радиометрические исследования морской поверхности в прибрежной зоне Черного моря // 2-я открытая Всероссийская конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Сб. науч. ст. М.: Grand polygraph, 2005. Т. 2. С. 103–111.
5. Поспелов М.Н., Кузьмин А.В., Садовский И.Н. Дистанционное измерение скорости и направления ветра над морской поверхностью с помощью микроволновой радиополяриметрии // Юбилейная Всероссийская науч. конф. «Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы». М., 2002. С. 50–51.
6. Садовский И.Н. Алгоритм восстановления параметров спектра гравитационно-капиллярных волн на основе данных угловых радиополяриметрических измерений // 7-я Международная научно-технич. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии»: Сб. докл. Владимир, 2006. С. 79–82.
7. Садовский И.Н. Исследование параметров морского волнения радиополяриметрическими методами // Конференция молодых ученых, посвященная Дню космонавтики: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2004. С. 28.
8. Садовский И.Н. Методика восстановления параметров спектра гравитационно-капиллярных волн на основе данных угловых радиополяриметрических измерений // 3-я Конференция молодых ученых, посвященная Дню космонавтики: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2006. С. 38.
9. Садовский И.Н., Кузьмин А.В., Поспелов М.Н. Измерение угловых зависимостей параметров стока теплового радиоизлучения взволнованной водной поверхности в лабораторных условиях // Всероссийская конф. «Современные

- проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Сб. науч. ст. М.: ИКИ РАН, 2003. С. 248–254.
10. *Садовский И.Н., Кузьмин А.В., Поспелов М.Н.* Исследование спектров морского волнения с помощью микроволновых радиометрических измерений в акватории Черного моря // 3-я открытая Всероссийская конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: Тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2005. С. 162.
 11. *Садовский И.Н., Кузьмин А.В., Поспелов М.Н.* Лабораторный эксперимент по измерению угловых зависимостей параметров Стокса теплового радиоизлучения взволнованной водной поверхности // Исследование Земли из космоса. 2005. № 1. С. 21–26.
 12. *Садовский И.Н., Кузьмин А.В., Поспелов М.Н.* Экспериментальные исследования радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности в лабораторных условиях // 9-я Всероссийская науч. конф. студентов-физиков и молодых ученых ВНКФС-9: Сб. докл. Красноярск, 2003. С. 764–766.
 13. *Садовский И.Н., Кузьмин А.В., Поспелов М.Н., Александров Д.В.* Исследование микроволнового излучения взволнованной водной поверхности на гравитационно-капиллярных масштабах в лабораторных условиях: Препринт. М.: ИКИ РАН, 2003. Пр-2089. 44 с.
 14. *Садовский И.Н., Кустов М., Никитин А.* Установка для радиотеплолокации // Областная научно-технич. конф. молодых специалистов и студентов «Проектирование и применение радиотехнических устройств»: Тез. докл. Владимир, 2000. С. 29–30.
 15. *Садовский И.Н., Никитин О.Р.* Результаты экспериментальных исследований радиотеплового излучения взволнованной морской поверхности // Научно-техническая конф. преподавателей, сотрудников и аспирантов факультета Радиофизики, электроники и медицинской техники. Владимир, 2003. С. 136–138.
 16. *Садовский И.Н., Поспелов М.Н., Кузьмин А.В.* Экспериментальные исследования собственного и рассеянного электромагнитного излучения морской поверхности на полигоне ЮО ИО РАН (г. Геленджик) в 2002 году // Научно-техническая конф. преподавателей, сотрудников и аспирантов факультета Радиофизики, электроники и медицинской техники. Владимир, 2003. С. 154–156.
 17. *Трохимовский Ю.Г., Садовский И.Н., Поспелов М.Н., Кузьмин А.В., Маречек С.В., Медведев А.П., Смирнов М.В., Тищенко Ю.Г.* Исследование радиояркой поверхности

температуры взволнованной поверхности моря в экспериментах «Геленджик 1999/2000» // Всероссийская научно-технич. конф. «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы астрокосмическими средствами»: Сб. докл. Муром, 2001. С. 255–259.

18. *Pospelov M., Kuzmin A., Medvedev A., Sadovsky I., Smirnov M., Trokhimovskii Yu., Tishchenko Yu.* Microwave radiometric measurements of waved sea surface carried out from a pier // Program and abstracts of Specialist Meeting on Microwave Remote Sensing. 5–9 Nov., 2001. Boulder, Colorado, USA. 2001. P. 185.
19. *Sadovsky I., Kuzmin A., Pospelov M.* The angular dependence of the Stokes parameters of thermal radio-emission from the rough water surface // Program and abstracts of 8th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing Application. 24–27 Feb., 2004. Rome, Italy. 2004. P. 185.
20. *Trokhimovskii Yu., Kuzmin A., Pospelov M., Irisov V., Sadovsky I.* Laboratory polarimetric measurements of microwave emission from capillary waves // Radio Science. 2003. V. 38. N° 3. 8039.