

Работа выполнена в Нижегородском государственном университете имени Н.И. Лобачевского.

На правах рукописи

Макаров Евгений Валерьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ИЗМЕНЧИВОСТИ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ
РАДИОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

01.04.03 – радиофизика
25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижегород – 2009

Научные руководители

доктор физико-математических наук,
профессор
С.Н. Гурбатов

доктор физико-математических наук
С.А. Ермаков

Официальные оппоненты

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Института
океанологии им. П.П. Ширшова
С.В. Переслегин

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиотехники
ННГУ
И.Я. Орлов

Ведущая организация

Институт космических исследований
РАН (Москва)

Защита состоится 23 декабря 2009 года на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: г. Нижний Новгород, пр. Гагарина 23, корп. , ауд. .

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Автореферат разослан _____ 2009 г.

Ученый секретарь



В.В. Черепенников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

За последнее десятилетие широкое развитие получили методы дистанционного зондирования Земли из космоса. Созданные системы доступа к спутниковым данным и большое количество научно-исследовательских спутников (Aqua, Terra, Envisat, Jason, Torex, SPOT и др.) предоставляют широкие возможности по оперативному мониторингу состояния Земли. Для дистанционного получения информации о поверхности суши и воды используются активные (радиолокационные, лидарные) и пассивные (СВЧ - радиометрия, оптические в условиях естественного освещения) средства дистанционной диагностики.

Существующие алгоритмы обработки спутниковых данных позволяют анализировать такие характеристики гидро- и атмосферы, как скорость ветра, содержание водяного пара над поверхностью воды, содержание фитопланктона в воде, и др. Основной техникой построения подобных алгоритмов является анализ корреляций спутниковых данных с результатами натуральных экспериментов в рамках соответствующих теоретических моделей.

Широкий круг теоретических моделей расчета параметров гидро- и атмосферы базируется на определении параметров мелкомасштабного ветрового волнения (ветровой ряби). Такие параметры и факторы как скорость ветра, скорость течения, поверхностное натяжение, присутствие пленок поверхностных веществ на воде взаимосвязаны и влияют друг на друга. Нелинейные модели взаимодействия волн, поверхностных веществ, ветра и течений позволяют определять динамические характеристики воды и воздуха. Однако, стоит отметить, что довольно широко используемые модели часто используют линейные приближения, которые не всегда выполняются на практике.

Так, например, общепринятым механизмом рассеяния радиоволн, на поверхностных волнах, в широком диапазоне длин волн и углов падения зондирующей электромагнитной волны, (от 20° – 25° до 75° – 80°), в настоящее время, является резонансное (брэгговское) рассеяние [1]. Результаты рассеяния в широком диапазоне длин волн и углов падения зондирующей электромагнитной волны (от 20° – 25° до 75° – 80°) трактуются в рамках теории брэгговского рассеяния [1]. Экспериментальные подтверждения действия этого механизма были даны для радиоволн с длинами порядка единиц – десятков метров (см., например, [2]) на основе измерений доплеровских сдвигов рассеянных радиосигналов и сопоставления полученных в результате скоростей рассеивающих волн и фазовых скоростей линейных ветровых волн в соответствующем диапазоне длин волн. Для гравитационно-капиллярных волн (ГКВ) с длинами порядка единиц сантиметров и менее (это соответствует рабочим длинам волн спутниковых локаторов) прямой экспериментальной проверки механизма рассеяния, насколько известно

автору, не проводилось. Особенностью волнения гравитационно-капиллярного диапазона является высокий уровень нелинейности волн, что, в частности, проявляется в обострении профиля и генерации высших гармоник волн, в том числе, “паразитной капиллярной ряби”. Особенностью ГКВ является высокий уровень нелинейности, что, в частности, проявляется в обострении профиля и генерации высших гармоник, в том числе, “паразитной капиллярной ряби”. Эффекты нелинейности ГКВ могут определять наблюдающиеся в эксперименте существенные отличия уровней модуляции, а также величин доплеровских сдвигов (соответствующих фазовым скоростям ГКВ) радиолокационных сигналов от значений, предсказываемых линейными моделями волнения [3–5]. Роль нелинейности поверхностных волн, поэтому, может оказаться существенной при анализе данных лабораторных экспериментов и натуральных наблюдений.

В главе I настоящей работы представлены результаты экспериментального исследования механизма рассеяния радиоволн Ка-диапазона (длина радиоволны 8,7 мм) на ГКВ в контролируемых лабораторных условиях.

Представлены результаты прямой проверки резонансного брэгговского механизма рассеяния на ГКВ малой амплитуды. Представлены также результаты исследования рассеяния на ГКВ конечной амплитуды.

В последнее время наблюдается рост интереса к определению параметров пленок поверхностных веществ (сликов). Большой интерес в данном вопросе обусловлен задачами обнаружения нефтяных разливов и прогноза вероятных сценариев дальнейшего развития ситуации.

Важным аспектом проблемы исследования сликов на морской поверхности является изучение их временной динамики. Одним из важных параметров нефтяных (или другого происхождения) пятен – сликов является их характерный размер. Общепринятые теоретические модели разделяют процесс расплывания пятен на характерные временные стадии растекания. В каждой стадии растекания преобладает тот или иной физический механизм.

Так, согласно классической работе Фэя [6], выделяют три режима: инерционный, гравитационно-вязкий и режим поверхностного натяжения. Однако, позднее было показано, что модель Фэя является приближенной и не описывает все режимы растекания. В основном уточнения касаются переходных режимов растекания. Так, например, в [7] установлено, что между гравитационно-инерционным и гравитационно-вязким режимами находится переходный инерционно-вязкий режим. В работе [8], где рассматриваются процессы растекания вещества в одномерном приближении в рамках уравнений мелкой воды, показано, что режимы в классификации Фэя являются асимптотиками более сложных решений. Теоретические модели растекания пленок, а также результаты экспериментов можно также найти, например, в [9, 10, 11] и цитированной там литературе.

Отметим, что в приведенных выше работах не рассматривается большое количество факторов и процессов, влияющих на динамику нефтяных

разливов. Однако, используемые на практике модели учитывают эмпирически ряд факторов, таких как испарение вещества, биодegradацию, перемешивание с водой, влияние льда и т.д. В то же время ряд гидродинамических процессов, в частности, роль ветра, неоднородности течений, внутренних и поверхностных волн, влияющих на динамику (растекание) нефти, исследован пока недостаточно. Упомянутые динамические процессы в верхнем слое океана и приповерхностного слоя атмосферы могут влиять на геометрическую структуру нефтяных загрязнений на больших временах. Кроме того, данные факторы играют определяющую роль при формировании биогенных (естественных) сликов.

Отметим довольно малое количество натуральных экспериментов в данной области. Типичным примером натурального «эксперимента» является изучение динамики нефтяного пятна после катастрофы танкера [12], где проводилось наблюдение развития растекания в течение длительного периода времени.

Отдельно стоит отметить сравнительно небольшое число натуральных экспериментов, посвященных непосредственной проверке справедливости используемых моделей и приближений, ввиду высокой сложности их регулярного проведения.

Проблеме исследования влияния ветра и ветрового волнения на динамику пленок поверхностных веществ посвящена глава II диссертации.

Одной из нерешенных задач спутникового мониторинга в настоящее время является определение возможности использования спутниковых систем для предупреждения цунами. Существующие системы предупреждения катастрофических цунами основываются на контроле сейсмической активности Земли. Данные системы хорошо себя зарекомендовали и успешно используются. Вместе с тем, создание систем мониторинга состояния океана после землетрясения предоставляет отдельную задачу. Направление распространения волнового фронта зависит от формы и размеров области первичных источников, которые генерируют волну. Слежение за распространением волны цунами в океане позволило бы уточнять и корректировать информацию, полученную от существующих систем предупреждения цунами. Изучению возможностей оптических методов диагностирования цунами на поверхности океана посвящена глава III данной работы.

Цель и задачи исследования.

Основная цель данной работы – изучение механизмов взаимодействия мелкомасштабного ветрового волнения с ветром и течениями в присутствии пленок поверхностно-активных веществ и изучение особенностей измерения параметров мелкомасштабного морского волнения оптическими и радиолокационными методами дистанционного мониторинга.

Конкретные задачи работы:

- исследование особенностей радиолокационного рассеяния на гравитационно-капиллярных волнах (диапазона мелкомасштабного ветрового волнения)

- исследование изменения спектров поверхностного ветрового волнения в присутствии пленок поверхностных веществ.

- исследование растекания пленок поверхностно-активных веществ на поверхности моря в присутствии ветра и ветрового волнения

- исследование модуляции мелкомасштабного ветрового волнения сантиметрового диапазона на крупных масштабах вследствие океанических процессов (цунами)

Научная новизна работы.

В работе впервые получены перечисленные ниже следующие результаты.

1. Дано прямое экспериментальное подтверждение справедливости использования брэгговского механизма рассеяния при рассмотрении задачи рассеяния р-л волн СВЧ диапазона на поверхности воды.

2. Показаны условия, при которых нелинейные эффекты распространения поверхностных волн и рассеяния электромагнитных волн приводят к существенным отклонениям от брэгговской модели рассеяния.

3. В ходе серии натуральных экспериментов экспериментально подтверждены закономерности растекания тонких пленок поверхностно-активных веществ на поверхности воды. Показано, что асимметричный характер растекания пленок поверхностных веществ (сликов) связан с взаимодействием сликов и ветрового волнения.

4. Показано, что полосовые пленочные слики могут формироваться в зонах сдвигов поверхностных течений. Коэффициент затухания волн в таких сликах и, соответственно, упругость пленок заметно превышают фоновые значения

5. На оптических спутниковых изображениях океана зарегистрирована волна цунами. На основе нелинейной модели взаимодействия ветра, ветровых волн и течения рассчитаны параметры крупномасштабной волны. Показаны возможности регистрирования катастрофических цунами на спутниковых изображениях.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Рассеяние радиоволн СВЧ - диапазона на монохроматических поверхностных волнах мм диапазона имеет резонансный характер, а ширина резонансных кривых рассеяния определяется шириной диаграммы направленности антенны скаттерометра.

2. При построении моделей радиолокационного рассеяния волн СВЧ диапазона на морском ветровом волнении (волнении с широким спектром) необходимо учитывать влияние нелинейности поверхностных ГКВ на сигнал обратного рассеяния и нелинейность механизма радиолокационного

рассеяния. В частности, эффект увеличения сечения обратного рассеяния за счет учета поправки к брэгговскому слагаемому может быть сравним с влиянием нелинейности ГКВ на сигнал обратного рассеяния.

3. Для тонких пленок поверхностных веществ на воде справедлив закон растекания в режиме преобладающей роли сил поверхностного натяжения. При этом, ветер (ветровое волнение) влияет на ассиметричное изменение формы пленок с течением времени.

4. Пленки поверхностных веществ, которые проявляются на поверхности моря в виде зон пониженного ветрового волнения могут формироваться в зонах сдвигов поверхностных течений.

5. Крупномасштабные изменения параметров ветрового волнения позволяют диагностировать прохождение волны цунами на оптических спутниковых изображениях морской поверхности и определять ее параметры на основе моделей взаимодействия ветра, ветрового волнения и течений.

Научная и практическая значимость работы.

Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при разработке алгоритмов и аппаратуры для дистанционной диагностики поверхности моря, оценке параметров поверхностного волнения, скорости и направления ветров и течений, поверхностных пленочных slickов.

Показанный эффект сравнимого влияния нелинейности поверхностных волн и радиолокационной нелинейности на сигнал обратного радиолокационного рассеяния позволяет строить более точные алгоритмы восстановления спектра поверхностного волнения на основе сигналов обратного рассеяния радиоскаттерометров. Важным также является экспериментальное подтверждение использования принципа брэгговского рассеяния радиолокационных волн на воде в СВЧ диапазоне.

Результаты исследования динамики пленок поверхностных веществ в присутствии ветра и поверхностного ветрового волнения углубляют понимание механизмов эволюции пленок и взаимодействия их с ветром и поверхностным волнением.

Результаты, относящиеся к обнаружению цунами на поверхности океана оптическими методами показывают возможность построения систем дистанционного оптического мониторинга цунами. Данные результаты также подтверждают возможность алгоритмического восстановления параметров поверхностного волнения, течений и крупномасштабных волн на основе данных оптических спутниковых изображений.

Полученные в диссертации результаты использовались в проектах Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 05-05-64137, 04-05-79015к, 04-05-64763№ 08-05-00634, 07-05-00125, 08-02-00631), программе ОФН РАН «Проблемы радиофизики», проектах ИНТАС (грант 03-51-4987, проект BOW) и научной школы НШ-1055.2008.2.

Апробация результатов работы и публикации.

Основные результаты диссертации докладывались на

международной конференции

- EARSel Workshop, Porto, 2005

российских конференциях

- II, III, IV, VI открытая Всероссийская конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса” (Москва, ИКИ РАН, 2004, 2005, 2006, 2008 гг.);

- Научная Конференция по радиофизике ННГУ, Н.Новгород 2005, 2006, 2007, 2008 гг.;

- Нелинейные волновые процессы. Конференция молодых ученых. ИПФ РАН, 2006 г.,

- Нижегородская сессия молодых ученых, 2005–2008 гг.

Семинарах

- ИПФ РАН.

Основные результаты работы опубликованы в 14 публикациях, из них 1 – статья в реферируемом журнале из списка ВАК, 1 – принята к печати в реферируемый журнал из списка ВАК, 5 препринтов ИПФ РАН, 1 сборник тезисов международной конференции, 4 – в сборниках тезисов всероссийских конференций, несколько – в тезисах региональных конференций.

Личный вклад автора

Автор участвовал во всех натуральных и лабораторных экспериментах и развитии теоретических моделей. Автор также принимал участие в постановке задач.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи работы, новизна полученных результатов и положения, выносимые на защиту, кратко изложено содержание диссертации.

Глава 1 посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию берегового рассеяния радиоволн на ГКВ. В **разделе 1.1** обсуждаются выводы классической линейной теории рассеяния радиоволн на ГКВ. В **разделе 1.2**, рассмотрен эксперимент, подтверждающий справедливость применения береговой теории рассеяния мм-диапазона на ГКВ малой амплитуды.

На рис. 1. видно, что полученная зависимость имеет резонансный характер. Ширина резонанса определяется диаграммой направленности скатеррометра.

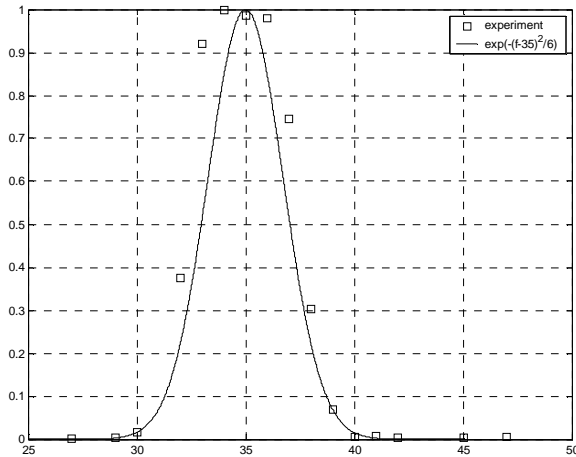


Рис. 1. Зависимость интенсивности р.л. сигнала от частоты ГКВ малой амплитуды

В разделе 1.3 рассмотрены нелинейные эффекты, проявляющиеся при рассеянии радиоволн на ГКВ. В разделе 1.3.1 рассмотрено влияние гидродинамической нелинейности ГКВ на сигнал обратного рассеяния. Показано, что если стационарная ГКВ с волновым числом k_0 содержит в своем спектре возбуждаемые из-за гидродинамической нелинейности гармоники высших порядков, в частности вторую гармонику с волновым числом $2k_0$, то возможно резонансное рассеяние на этой гармонике. Показано также, что в условиях лабораторного эксперимента, когда ГКВ генерируется волнопродуктором, ситуация оказывается более сложной, чем при распространении ветровых волн. Как было показано в [4], при возбуждении поверхностной волны возникают волны удвоенной частоты разных типов. Первый тип – II гармоника ГКВ, фазовая скорость которой совпадает со скоростью основной волны (в дальнейшем будем называть ее связанной или вынужденной волной). Второй тип – волна с фазовой скоростью, определяемой линейным дисперсионным соотношением ГКВ (свободная волна). Исходя из этого, показано что при перестройке частоты основной ГКВ условие резонансного (брэгговского) рассеяния для волновых компонент II приближения будет выполняться при двух частотах ГКВ. При этом, если соответствующие частоты достаточно сильно разнесены (по сравнению с характерной шириной резонансной кривой), то зависимость мощности сигнала на второй гармонике от частоты ГКВ должна иметь характер “двугорбой” резонансной кривой. Данная кривая получена в ходе лабораторных экспериментов (рис. 2).

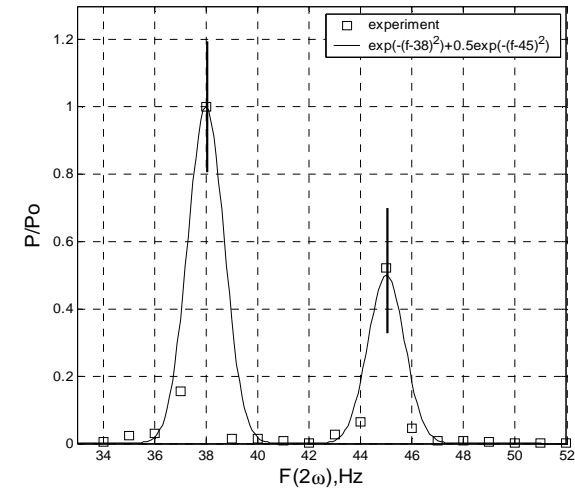


Рис. 2. Резонансная кривая мощности р.л. сигнала на частоте второй гармоники ГКВ, нормированная на интенсивность рассеивающей волны

Различие высот резонансных пиков может быть связано с вкладом радиолокационной нелинейности в пик на частоте вынужденной волны. В разделе 1.3.2 показано, что соотношение вкладов от радиолокационной и гидродинамической нелинейности является в величину сечения обратного рассеяния на удвоенной частоте является функцией угла падения, и зависит от диапазона поверхностных волн. Так, для гравитационных волн, это соотношение выглядит следующим образом:

$$\frac{\sigma_{Bragg(2)}}{\sigma_r} = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^2 \alpha, \text{ а для капиллярных волн, } \frac{\sigma_{Bragg(2)}}{\sigma_r} = \frac{1}{8} \operatorname{tg}^2 \alpha.$$

Теоретическая оценка соотношения вкладов от гидродинамической и радиолокационной нелинейности в эксперименте составляет

$$\frac{\sigma_{Bragg(2)}}{\sigma_r} \approx 0.7, \text{ это приводит к тому, что величина}$$

пика на частоте вынужденной волны должна быть в 2–2,5 раза больше пика на частоте свободной волны. Данная оценка находится в соответствии с экспериментом.

Отметим в заключение, что проведенные лабораторные исследования по рассеянию радиоволн на квазигармонических ГКВ могут рассматриваться и как масштабное моделирование радиолокационного зондирования моря в КВ диапазоне.

Материалы и результаты, используемые в главе 1, были обсуждены и опубликованы в работах 2*, 3*, 5*, 10*.

Глава 2 посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию методов пассивного оптического зондирования морской поверхности.

В разделе 2.1, являющимся в значительной мере методическим, рассмотрены общие принципы формирования светового поля, рассеянного на морской поверхности. Рассмотрены случаи формирования изображения в рассеянном свете неба и в зоне солнечной дорожки.

В разделе 2.2 приводится исследование факта обнаружения цунами на оптических спутниковых изображениях.

Анализируемые изображения были получены спутником Envisat 26 декабря 2004 г. (Product Type Mer_FR__1P, Orbit: 14759). Район съемки – Индийский Океан, время съемки 26 декабря 2004 года, 03.59-04.11 UTC. На рис. 3 приведен фрагмент спутникового изображения. На рис. 3 представлен район г. Рангуна, через три часа после землетрясения в районе о-ва Суматры, ставшего причиной возникновения волны цунами в Индийском океане. По расчетам и свидетельствам очевидцев [см. например 14, 15], в данное время в этом районе проходила волна катастрофического цунами 26 декабря 2004 года.

Первоначально была проверена версия возникновения полосы из-за особенностей обтекания прибрежными течениями донного рельефа. Однако данная гипотеза была опровергнута после анализа батиметрии данного района.

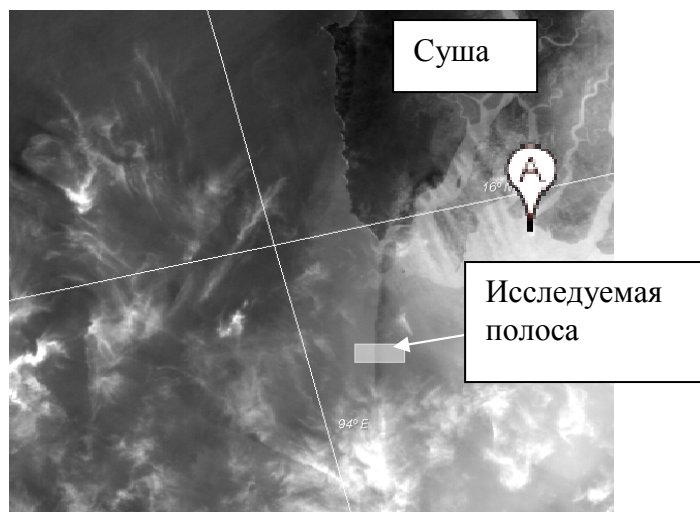


Рис. 3. Фрагмент спутникового изображения Meris 26.12.2004 г. Канал radiance_1

Был проанализирован контраст изображения полосы (рис. 4).

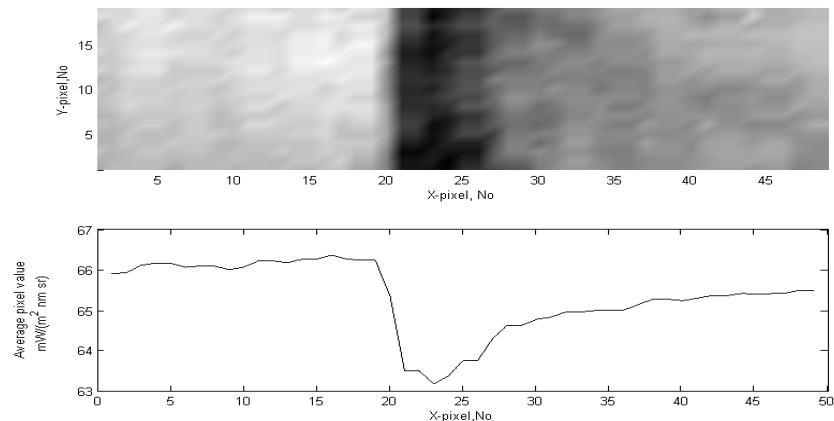


Рис. 4. Анализируемый фрагмент изображения и усредненный профиль интенсивности (в одном пикселе 300 м).

Полученная зависимость контраста от длины волны приведена на рис. 5. Видна растущая зависимость контраста оптического изображения полосы в зависимости от длины волны. Минимальный контраст меньше максимального в три раза. Причем оптический контраст на правой границе полосы примерно в два раза больше чем слева. Уменьшение контраста на длине волны порядка 760 нм, по-видимому, связано с полосой поглощения кислорода 761 нм.

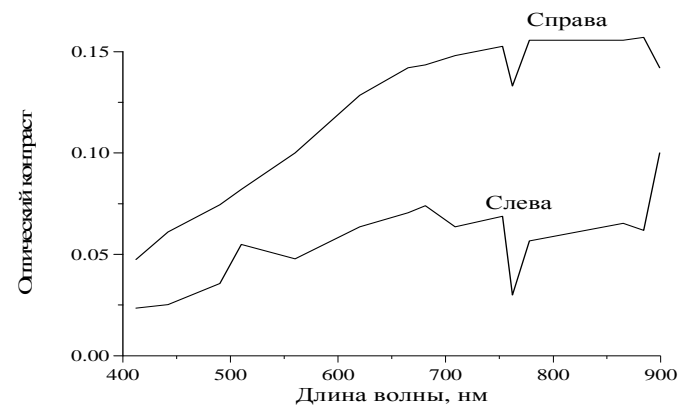


Рис. 5. Зависимость контраста изображения С полосы от длины волны (контрасты правой – восточной и левой – западной границ полосы)

Показано, что для условий наблюдения изображение поверхности в зоне наблюдения полосы в 13–15 каналах определяется отраженным от морской поверхности излучением. В сине-голубом диапазоне яркость поверхности определяется как отраженным, так и выходящим из-под поверхности излучением. Такая оценка объясняет растущую зависимость контраста оптического изображения полосы в зависимости от длины волны на рис. 5.

Предполагая, что волнение изотропно и наклоны волн одинаково меняются в направлениях x и y при изменении скорости трения, абсолютное значение контраста изображения можно записать в виде:

$$C = \frac{\Delta I_1}{I_1} = \left| \frac{\Delta s^2}{s^2} \left(\frac{\alpha_x^2 + \alpha_y^2}{s^2} - 1 \right) \right| \quad (1)$$

При малых скоростях ветра изменение компоненты скорости трения в направлении распространения волны цунами может быть оценено следующим образом (см. [17])

$$\Delta u_y^* = \frac{\kappa U_{w0}}{\ln \left(\frac{3.487 \omega v_a}{\kappa u_0^{*2}} \right) - 1 - 5.38 \frac{2u_0^* - u_c^*}{u_c^*} + \frac{\pi i}{2}}, \quad (2)$$

где U_{w0} , – максимальное значение орбитальной скорости частиц в волне,

$\omega = \sqrt{gH} \frac{2\pi}{\Lambda}$, Λ – характерный масштаб процесса, характеризующий длину волны основной гармоники, по которой можно оценивать фазовую скорость, u_0^* – скорость трения ветра, $u_c^* = 4.95$ см/с – критическое значение скорости трения ветра.

Полагая, что мелкомасштабное волнение изотропно, и дисперсия наклонов волн линейно зависит от скорости трения ветра [18,19] относительное изменение дисперсии наклонов волн можно оценить как

$$\frac{\Delta s^2}{s^2} \sim \frac{\Delta u^*}{u_0^*} = \frac{\sqrt{u_x^{*2} + u_y^{*2}} - \sqrt{u_x^{*2} + (u_y^* - \Delta u_y^*)^2}}{u_0^*} \quad (3)$$

По величине оптического контраста изображения используя (1)–(3) можно оценить величину орбитальной скорости и, учитывая, что в области наблюдения длина волны много больше глубины, оценить амплитуду a волны из соотношения $U_{w0} = \sqrt{\frac{g}{H}} a$, где H – глубина моря. Оценка амплитуды

волны составила величину порядка 1,4 м, что неплохо согласуется с результатами численного моделирования [14], данными очевидцев и натурных наблюдений и измерений, проведенных с морских буев и другими методами [14, 15].

Данный результат свидетельствует о потенциальной возможности регистрации проявлений волн цунами на морской поверхности системами оптического спутникового мониторинга.

Материалы и результаты, используемые в главе 2, были обсуждены и опубликованы в работах 8*, 9*, 11*, 12*, 19*.

Глава 3 посвящена исследованию закономерностей динамики искусственных и естественных сликов (пленок поверхностно-активных органических веществ) на поверхности моря.

В **разделе 3.1.** описана методика и приведены результаты экспериментов по изучению растекания искусственных пленок на поверхности моря. В данном разделе описаны эксперименты по исследованию растекания пленок с помощью фотографий и подспутниковые эксперименты (рис. 6)

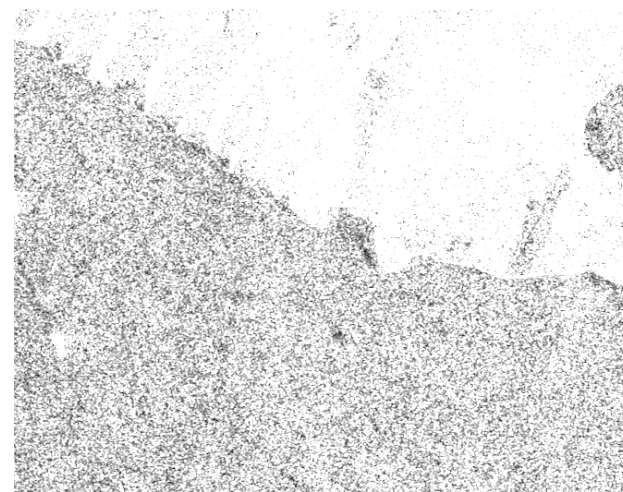


Рис. 6. Карта района экспериментов и его радиолокационное изображение. В центре изображения виден слик

Показано, что закон растекание тонких пленок проходит с асимптотическим стремлением к закону $t^{3/4}$, что находится в качественном согласии с результатами работы [6].

Необходимо также отметить, что в присутствии ветра, форма сликов отличается от осесимметричной. Слик обычно вытягивается в направлении ветра.

В разделе 3.2. рассмотрено изменение формы слика под действием ветра.

На границе слика затухающие поверхностные волны создают давление на слик, за счет индуцированного ими течения, направленного внутрь слика. Механизм давления на пленку со стороны затухающих поверхностных волн исследовался, например, в [16].

В предположении, что влияние индуцированного течения пропорционально размеру слика, в рамках теории Фэя можно показать, что соотношение длин осей слика в присутствии ветра имеет следующий вид:

$$\frac{l_{\parallel}}{l_{\perp}} = \left(\frac{S}{S - \int \lambda(k) \tau_m(k) \psi(k) dk} \right)^{1/2} \quad (4)$$

где $S = S_{23} - (S_{21} + S_{13})$ – разность коэффициентов поверхностного натяжения воды, воздуха и пленки, ν – плотность воды, умноженная на вязкость воды l – размер слика (продольный и поперечный по отношению к направлению ветра), t – время, $\lambda(k)$ – размер области затухания волны, $\tau_m(k)$ – среднее индуцированное волновое напряжение, создаваемое волной единичной амплитуды с волновым числом k , $\psi(k)$ – спектр поверхностного волнения.

Таким образом, слик имеет форму, вытянутую по ветру. Причем пропорции формы слика в данном приближении не меняются в процессе растекания (при постоянной скорости ветра).

Учитывая, что при малой скорости ветра и возбуждении волн в режиме слабой надкритичности, кривизна наиболее неустойчивой волны удовлетворяет уравнению Гинзбурга-Ландау:

$$\frac{d\xi}{dt} = r(u^* - u_c^*)\xi - \xi |\xi|^2 \gamma \quad (5)$$

Можно получить зависимость соотношения осей слика от скорости ветра:

$$\frac{l_{\parallel}}{l_{\perp}} = \left(\frac{S}{S - \lambda(k_0) \tau_m(k_0) r \frac{u^* - u_c^*}{2\gamma k_0^2}} \right)^{1/2} \quad (6)$$

где $\lambda(k_0)$ – длина затухания волны с волновым числом k_0 . По данным работы [3] $\lambda(k_0) \sim 200$ см.

Для сравнения теоретических и экспериментальных данных были взяты следующие значения: $r = 0.0122$ см⁻¹, $\gamma = 1.09$ с⁻¹, $k_0 = 1$ см⁻¹, $S = 30$ дин/см, скорость ветра 2 м/с. При выбранных параметрах соотношение осей должно составлять величину порядка 2. Выбранным условиям соответствуют три натуральных эксперимента – 2004, 2005, 2007 гг., результаты которых представлены ниже.

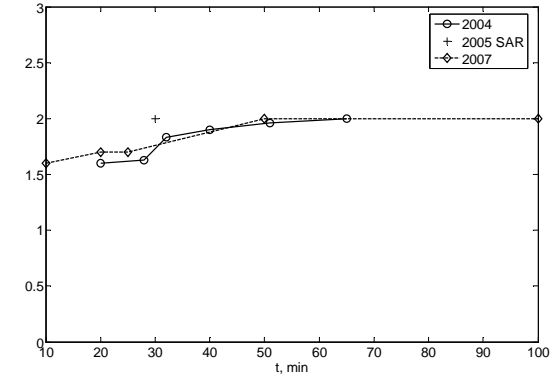


Рис. 7. Соотношение длин осей сликов в зависимости от времени

По результатам трех экспериментов видно (рис. 7), что соотношение длин осей при слабом ветре близко к качественным оценкам (6). Отметим, что в 2005 году проводился подспутниковый эксперимент, точка получена из данных радиолокационного изображения морской поверхности. Таким образом, результаты экспериментов хорошо соотносятся с предложенным механизмом взаимодействия ветрового волнения и пленочных сликов.

В разделе 3.3. приведены результаты исследования связи естественных сликов на морской поверхности со структурой поверхностных течений.

По полученным данным можно оценить скорости в тонком (толщиной около 5 мм) поверхностном слое воды. Так, из данных экспериментов следует, что сликовые полосы локализованы в области сдвига скорости течения, отличие скоростей течений с разных сторон сликов составляет величины порядка 1–2 см/с. При этом, наряду со сдвигом скорости, существует и поперечная к границам слика составляющая скорости.

Материалы и результаты, используемые в главе 3, были обсуждены и опубликованы в работах 4*,6*,7*, 12*,13*, 14*, 15*, 16*, 17*,18*.

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации.

1. В условиях лабораторного эксперимента дано прямое подтверждение резонансного (брэгговского) механизма рассеяния электромагнитных волн мм-диапазона на гравитационно-капиллярных волнах малой амплитуды: показано, что зависимости интенсивности обратного рассеяния радиоволн от частоты и направления распространения ГКВ имеют вид резонансных кривых, максимумы которых отвечают ГКВ с волновым вектором, отвечающим брэгговскому условию, а ширина резонансных кривых определяется шириной диаграммы направленности антенны скаттерометра.

2. В лабораторных условиях исследованы особенности радиолокационного рассеяния на ГКВ конечной амплитуды. Показано, что зависимость интенсивности сигнала обратного рассеяния от частоты ГКВ характеризуется наличием двух максимумов: один из них связан с резонансным рассеянием на линейных (свободных) брэгговских волнах, другой – с рассеянием на второй гармонике ГКВ с длиной, также удовлетворяющей условию брэгговского резонанса (вынужденная волна). Экспериментально показано, что пространственная структура поля волнения на удвоенной частоте ГКВ имеет вид биений, из-за присутствия свободной волны и второй гармоники ГКВ. Определено соотношение амплитуд этих компонент, возникающих при возбуждении основной ГКВ. Дано объяснение полученных особенностей рассеяния на основе анализа структуры ГКВ и механизма рассеяния во втором порядке теории возмущений.

3. В результате исследования оптических спутниковых изображений восточной части Бенгальского залива, показано, что на основе анализа оптических спутниковых изображениях океана возможна регистрация волны цунами и определение ее параметров, с использованием модели формирования спутникового оптического изображения поверхностной волны.

4. В результате натурных экспериментов дано подтверждение режима растекания поверхностно-активных веществ, определяющийся силами вязкости и поверхностного натяжения, показано, что закон изменения масштаба пятна во времени удовлетворительно описывается зависимостью $t^{3/4}$. Экспериментально установлено, что под действием ветра пятно становится асимметричным (вытянутым по ветру), предложена модель растекания пятна, учитывающая влияние ветровых волн на асимметрию слика в условиях слабонадкритического режима возбуждения ветрового волнения. Показано, что форма слика (соотношение между осями эллипса) остается неизменной во времени и зависит только от скорости ветра и характеристик пленок.

5. В ходе натурных экспериментов установлена связь полосовых пленочных сликов в прибрежной зоне с приповерхностных течениями. Показано, что слики образуются на градиенте поверхностной скорости за счет повышенной концентрации пленок ПАВ, которые группируются под действием поперечной к границам слика составляющей скорости течения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1*. С.А. Ермаков, Макаров Е.В., И.А. Сергиевская, Ю.Б. Щегольков, Л.А. Гушин, И.А. Репина, А.Ю. Артамонов. Экспериментальные исследования эффекта гашения гравитационно-капиллярных волн пленками нефтепродуктов. Предварительные результаты. Препринт ИПФ РАН № 646, 2003 г.

2*. С.А. Ермаков, Макаров Е.В., И.А. Сергиевская, Ю.Б. Щегольков, Л.А. Гушин. О доплеровских сдвигах частоты радиолокационных сигналов в сликах Препринт ИПФ РАН №668. 2004.

3*. С.А. Ермаков. Макаров Е.В., Лабораторное исследование резонансного рассеяния радиолокационных сигналов гравитационно-капиллярными волнами. Препринт ИПФ РАН № 669. 2004

4*. С.А.Ермаков, Макаров Е.В., О.Ю. Лаврова, И.А.Сергиевская, Б.Щегольков, Л.А.Гушин. Натурные эксперименты по растеканию пленок нефтепродуктов и их радиолокационному зондированию. Тезисы докладов II открытой Всероссийской конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, 16-18 ноября, 2004

5*. С.А.Ермаков, Макаров Е.В., И. А. Сергиевская. Лабораторное исследование радиолокационного рассеяния на гравитационно-капиллярных волнах. Тр. (девятой) Научной Конференции по радиофизике «Факультет – ровесник победы». 7 мая 2005 г. / Ред. А.В.Якимов. – Нижний Новгород: ТАЛАН, 2005.

6*. Ермаков С.А., Макаров Е.В., И.А. Сергиевская, Ю.Б. Щегольков, Л.А.Гушин. Натурные исследования динамики пленочных сликов в прибрежной зоне Черного моря. Препринт ИПФ РАН № 679,2005.

7*. S. Ermakov, Makarov E., I. Sergievskaya, Yu. Shchegolkov, L. Gushin Proc. 2nd EARSeL. Field studies of film slicks in shear currents. Workshop on Remote Sensing of the Coastal Zone, Porto, 2005.

8*. Ермаков С.А., Макаров Е.В., Сергиевская И.А., Троицкая Ю.И. Тезисы докл. III открытой Всероссийской конф. Оптические спутниковые наблюдения волны цунами 26 декабря 2004 г. "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, 2005

9*. Ермаков С.А., Макаров Е.В., Сергиевская И.А., Троицкая Ю.И. О проявлениях волны цунами 26 декабря 2004 г на оптических спутниковых изображениях. Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Троицкая Ю.И.

10*. С.А.Ермаков, Макаров Е.В., И.А.Сергиевская. Лабораторное исследование радиолокационного рассеяния на гравитационно-капиллярных волнах. Известия академии наук «Физика атмосферы и океана», 2007.

11*. Сергиевская И.А., Макаров Е.В., Ермаков С.А. Оптическое исследование двумерных спектров ветрового волнения. Сборник тезисов IV всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 2006 г.

12*. Сергиевская И.А., Макаров Е.В., Ермаков С.А., Сборник тезисов IV всероссийской открытой конференции. «Обнаружение и идентификация загрязнений на морской поверхности по оптическим космическим изображениям» «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 2006 г.

13*. Ермаков С.А., Макаров Е.В., Сергиевская И.А. Серия натурных экспериментов по изучению динамики искусственных сликов. Тезисы 12 Нижегородской сессии молодых ученых.

14*. Ермаков С.А., Макаров Е.В., Сергиевская И.А. «Влияние ветра на изменение формы искусственного слика». Тезисы докладов (Одиннадцатой) Научной конференции по радиофизике, посвященная 105-й годовщине со дня рождения М.Т. Греховой, ННГУ, 2007.

15*. Ермаков С.А., Макаров Е.В., Сергиевская И.А. Исследование растекания пленок на морской поверхности в присутствии ветра. Труды Научной конференции по радиофизике, ННГУ, 2008

16*. Ермаков С.А., Капустин И.А., Лазарева Т.Н., Макаров Е.В., Сергиевская И.А. Наблюдения сликовых полос и неоднородных течений в прибрежной зоне Черного моря. Шестая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 10-14 ноября 2008 г.

17*. Ермаков С.А., Макаров Е.В., Сергиевская И.А. Исследование растекания пленок поверхностно-активных веществ на морской поверхности в присутствии ветра. Шестая всероссийская открытая ежегодная конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 10-14 ноября 2008

18*. Ермаков С.А., Макаров Е.В., Сергиевская И.А. Исследование растекания пленок на морской поверхности в присутствии ветра. Труды Научной конференции по радиофизике, ННГУ, 2008

19*. С.А. Ермаков, Е.В. Макаров, И.А. Сергиевская, С.Н. Гурбатов. Проявления волны цунами на оптических спутниковых изображениях. Вестник ННГУ, 2009, № 6. С. 58-66.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Басс Ф.Г., Фукс И.М.* Рассеяние волн на статистически неоднородной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
2. *Каневский М.Б.* Теория формирования радиолокационного изображения поверхности океана". Н. Новгород, ИПФ РАН. 2004. 124 с.
3. *Hara T., Plant W.J.* Hydrodynamic modulation of short wind-wave spectra by long waves and its measurement using microwave backscatter // *J. Geophys. Res.* 1994. V.99, N.C5. P. 9767-9784.
4. *Юэн, Б. Лэйк.* Нелинейная динамика гравитационных волн на глубокой воде. М.: "Мир", 1987.
5. *Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Зуйкова Э.М., Кияшко С.В., Щегольков Ю.Б.* Об эффекте изменения доплеровских сдвигов частоты радиолокационных сигналов в присутствии органических пленок на морской поверхности // Доклады РАН. 2003. Т. 388, № 1. С. 109-112.
6. *Fay J.A.,* The spread of oil slicks on a calm sea. In: Hoult, D.P. (ed.), *Oil on the Sea.* Plenum New York (1969) pp. 53–63.
7. *Unni Hajime, Inone Ichiro.* Initial behavior of oil slick. *Journal Chem. Eng. Jap.*, 1978, v. 11, N 1, p. 13-18.
8. *Г.К. Коротаев, В.А. Кропотынцева.* Интегральная модель динамики нефтяного разлива.
9. *Монин А.С., Красицкий В.П.* Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеиздат. 1985. 376 с.
10. *Журбас В.М.* Основные особенности распространения нефти в море // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа, М.: ВИНТИ. 1978. Т. 12. С. 144-159.
11. *W.R.C. Phillips.* On the Spreading Radius of Surface Tension Driven Oil on Deep Water // *Applied Scientific Research* 57: 67–80, 1997. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
12. *Stephen P. Murray.* Turbulent diffusion of oil in the ocean // *Limnology and oceanography.* September 1972 V. XVII, № 5.
13. *Зарембо Л.К., Красильников В.А., Тхай Тхань Лонг.* О нелинейных явлениях при распространении капиллярных волн. 1969, т.11, №5, с.132-133.
14. *I. Suresh, S. Neetu, D. Shankar, S.S.C. Sheno, S.R. Shetye, D. Sundar.* The 2004 indian ocean tsunami: description of the event and estimation of length of the tsunami source region based on data from indian tide gauges *Proceedings of the Eleventh Asian Congress of Fluid Mechanics* 22-25 May 2006, Kuala Lumpur, Malaysia.
15. *Kenji Satake, Than Tin Aung, Yuki Sawai, Yukinobu Okamura, Kyaw Soe Win, Win Swe, Chit Swe, Tint Lwin Swe, Soe Thura Tun, Maung Maung Soe, Thant Zin Oo, and Saw Htwe Zaw.* Report «Tsunami heights and damage along the Myanmar coast from the December 2004 Sumatra-Andaman earthquake». *Earth, Planet and Space*, 2005.
16. *Ермаков С.А., Сергиевская И.А., Зуйкова Э.М., Кияшко С.В., Щегольков Ю.Б.* Об эффекте изменения доплеровских сдвигов частоты радиолокационных сигналов в присутствии органических пленок на морской поверхности // Докл. РАН. 2003. Т. 388. № 1. С. 109-112.
17. *Yu.I. Troitskaya, S.A. Ermakov.* Manifestations of the Indian Ocean tsunami of 2004 in satellite nadir-viewing radar backscatter variations // *Geophysical Research Letters.* V. 33, L04607, doi: 10.1029/2005GL024445 2006
18. *Cox C., Munk W.H.* Statistics of the sea surface derived from Sun glitter // *J. Marine res.* 1954. V. 13, № 2. P. 198-227.
19. *Cox C., Munk W.H.* Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter // *J. Opt. Soc. America.* 1954. V. 44, № 11. P. 838-850.

Евгений Валерьевич Макаров

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ РАДИОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 18.11.2009 г.

Формат 60 × 90 ¹/₁₆. Бумага офсетная № 1.

Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № 112(2009)

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46