

На правах рукописи
УДК 551.46.09 : 528.8.044.2

Иванова Наталья Алексеевна

**РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ
ЗАГРЯЗНЕНИЙ МОРЯ ИЗ КОСМОСА: МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И
НЕКОТОРЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ**

Специальность 25.00.28 – океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2008

Работа выполнена в Российском Государственном Гидрометеорологическом Университете (РГГМУ).

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Кудрявцев Владимир Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Мелентьев Владимир Владимирович

Санкт-Петербургский Государственный Университет
Аэрокосмического Приборостроения

кандидат физико-математических наук, доцент

Сычев Виталий Иванович

Российский Государственный Гидрометеорологический
Университет

Ведущая организация:

Научный Центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ),
РОСКОСМОС

Защита состоится « 19 » июня 2008 г. в 15 час. 30 мин. на заседании
Диссертационного совета Д – 212.197.02 при Российском Государственном
Гидрометеорологическом Университете по адресу:
195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского Государственного
Гидрометеорологического Университета.

Автореферат разослан « 15 » мая 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор географических наук

Воробьев В. Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Исследования океана из Космоса с помощью дистанционной аппаратуры, работающей в различных спектральных диапазонах, имеют неопределимую научную и практическую значимость. Спутниковая информация обладает высоким пространственным разрешением, покрывает значительные области Мирового Океана, и, в настоящее время, дает важную информацию о таких физических процессах, как уровенная поверхность и геострофические течения, высота волн, поле приводного ветра, границы мезо-масштабных течений, цвет океана и сопутствующие ему характеристики (хлорофилл, минеральные взвеси), поверхностные загрязнения и пр. Однако, информационные возможности спутниковых данных далеко не исчерпаны, и все еще остается значительное поле для дальнейшего развития в этой области знаний.

Так, одной из слабо изученных остается проблема дистанционной идентификации поверхностных загрязнений океана. Не смотря на то, что поверхностные загрязнения могут быть достаточно легко идентифицированы на дистанционных изображениях, задача определения типа загрязнения (искусственное или естественное) и его характеристик (толщина, поверхностная концентрация) остается в данное время фактически не исследованной. Особую важность имеет задача дистанционной идентификации загрязнения поверхности океана нефтепродуктами. Эта проблема особенно актуальна в связи с быстрым возрастанием объемов морской транспортировки нефти через северные моря (Баренцево, Норвежское, Печорское). Таким образом, существует необходимость в разработке физических моделей влияния нефтяных загрязнений на морскую поверхность и ветровое волнение и приложения этих моделей для разработки методов дистанционного контроля нефтяных загрязнений. Среди возможных методов зондирования океана из космоса приоритет отдается методам радиолокационного зондирования (радиолокаторами с синтезированной апертурой, РСА), которые являются всепогодными, не зависящими от времени суток и обладают высоким пространственным разрешением.

Биогенные пленки распространены по всему Мировому Океану и, подавляя короткие ветровые волны, оказывают заметное влияние на обмен импульсом, теплом и газом (в частности CO_2) между океаном и атмосферой. Таким образом, важно знать географическую протяженность и изменчивость таких пленок для последующих оценок их результирующего воздействия на климатическую систему. [Espedal *et al.*, 1996] Мезо-масштабные океанические

явления, такие как вихри и меандры на границах течений, часто видны на РСА изображениях вследствие скопления биогенных пленок в зонах конвергенции течений, что вызывает еще больший интерес к исследованию в данной области. [Espedal *et al.*, 1998]

При исследовании поверхностных загрязнений, возникает одна частная, но важная практическая подзадача, – исследование особенностей дистанционной идентификации поверхностных загрязнений в прибрежной зоне и полыньях, то есть в областях с пространственно ограниченным развитием ветрового волнения. Исследования в таких зонах очень актуальны, так как прибрежные зоны являются зонами наиболее частых искусственных нефтяных загрязнений, а нефтяные загрязнения в северных морях могут сопровождаться захватом нефти в полыньях. Поскольку шероховатость поверхности, по которой и определяются характеристики загрязнения, неизбежно связана с полем ветра, то восстановление последнего по РСА данным приобретает особое значение. К настоящему времени существуют хорошо отработанные методики восстановления скорости ветра по данным РСА для открытого океана, однако они не пригодны для восстановления ветра в условиях ограниченных разгонов, что и вызывает необходимость разработки специальной методики.

Цель исследования.

Основной целью является проведение комплекса исследований, направленных на улучшение методов идентификации и определения количественных характеристик поверхностных загрязнений на основе радиолокационных изображений открытого моря и зон с ограниченным разгоном ветровых волн.

Задачи.

Для достижения поставленной цели, были определены следующие задачи:

1. Разработка модели влияния биогенных и нефтяных пленок на спектр коротких ветровых волн.
2. Исследование особенностей рассеяния радиоволн на морской поверхности, покрытой биогенными и нефтяными пленками. Построение радиолокационной модели.
3. Тестирование разработанных моделей влияния поверхностных пленок на статистические характеристики морской поверхности и обратное рассеяние радиоволн на данных лабораторных и натурных экспериментов.
4. Исследование возможности определения количественных характеристик нефтяных загрязнений (толщина пленки, объем разлитой нефти и т.д.) по РСА изображениям.

5. Исследование ветро-волнового режима в условиях ограниченного разгона. Разработка методики и оценка точности восстановления поля ветра по РЛ данным в условиях ограниченного разгона волн (прибрежная зона, полыньи).
6. Применение разработанных моделей для выявления и анализа естественных и искусственных загрязнений на РСА изображениях, получаемых с ИСЗ ENVISAT.

Научная новизна.

Предложена новая модель формирования контрастов спектра ветровых волн, вызванных поверхностными пленками. Модель учитывает механизм нелинейной передачи энергии от длинных волн (не «чувствующих» пленки) к коротким волнам, которые подвержены гасящему действию пленок. Такого типа механизм никогда не рассматривался в теоретических работах по этой проблеме. Этот механизм обеспечивает конечный уровень энергии волн в сликах, что подтверждается данными экспериментов.

Спектральная модель применена для создания модели проявления пленок в РЛ сигнале. Показано, что в рамках композитной РЛ модели зеркальные отражения от нелинейных особенностей поверхности (обрушений волн) могут играть важную роль в формировании РЛ контрастов сликов. Предложенная феноменологическая РЛ модель согласуется с данными измерений на количественном уровне.

Впервые исследована зависимость РЛ контраста нефтяных загрязнений поверхности от толщины пленки и скорости ветра. Полученные результаты могут быть использованы при создании оперативных методик определения количественных характеристик нефтяных загрязнений по РЛ данным. Существующие в настоящее время методы идентификации поверхностных загрязнений на РЛ изображениях носят в основном качественный характер, то есть устанавливают факт загрязнения без определения его природы и количественных характеристик. Предлагаемый подход основывается на физическом моделировании воздействия поверхностных пленок на спектр ветровых волн и РЛ сигнал. Такой подход позволяет исследовать особенности РЛ проявления различного типа загрязнений и сформулировать требования к оптимальной «конфигурации» РЛ системы (длина и поляризация радиоволн и их комбинация, углы падения, ветровые условия, т.д.), позволяющие определить количественные характеристики загрязнений с максимальной достоверностью.

Проведено обобщение известного алгоритма восстановления скорости ветра по РЛ данным (обобщение эмпирической РЛ функции CMOD-4/5) на условия ограниченного разгона

ветровых волн. Это обобщение расширяет область применения широко используемого алгоритма восстановления ветра, что в контексте данной работы необходимо для определения характеристик нефтяных загрязнений в прибрежной зоне и полыньях.

Теоретическая и практическая значимость.

Исследования, представленные в данной работе, проводились в соответствии с научными планами РГГМУ и «Нансен-Центра» в рамках международных проектов: «Marine oil spill control: SAR monitoring and model prediction» (OSCSAR); ESA-IAF Project on GMES Networking with Russia and Ukraine; «Monitoring the marine environment in Russia, Ukraine and Kazakhstan using Synthetic Aperture Radar» (MONRUK); EU FP-6 Project, Priority 4, Aeronautic and Space; «DEvelopment of Marine Oil Spills/slicks Satellite monitoring System elements targeting the Black/Caspian/Kara/Barents Seas» (DEMOSSS); INTAS Project, Ref.N: 06-100025-9264.

Проведенные исследования эффекта влияния нефтяных и биогенных пленок на короткие ветровые волны имеют «самостоятельную» теоретическую значимость, т.к. способствуют дальнейшему развитию теории ветровых волн на морской поверхности. Кроме этого, развитая модель спектра волн в присутствии поверхностных пленок и ее приложение к задаче рассеяния радиоволн создает физический базис для развития методов определения количественных характеристик поверхностных загрязнений по данным РСА изображений. Предложенный подход позволяет определить и сформулировать требования к оптимальной конфигурации РЛ системы (длина и поляризация радиоволн и их комбинация, углы падения, ветровые условия и т.д.), позволяющие определить количественные характеристики загрязнений с максимальной достоверностью.

Результаты сопоставления модельных оценок РЛ контрастов с данными наблюдений показывают, что предлагаемая модель может быть использована на практике для оценки характеристик нефтяных загрязнений по РСА изображениям.

Предложенная методика восстановления скорости ветра по РСА при ограниченных разгонах волн расширяет область применения существующих стандартных моделей/алгоритмов восстановления скорости ветра (предназначенных изначально для условий открытого океана) на условия прибрежной зоны и любых пространственно ограниченных водоемов.

Предложенная модель трансформации ВПС позволяет уточнять расчеты скорости ветра в прибрежной зоне, что может быть необходимо при расчетах спектра волн с целью диагностики загрязнений, при строительстве прибрежных конструкций, прогнозировании ветровой энергии

(использование ветровых генераторов энергии), различных видах отдыха и спортивной деятельности, навигации, расчетах в случае загрязнений воздуха.

Результаты анализа РСА изображений Баренцева моря дают представление о существующем уровне нефтяных загрязнений моря, их пространственном распределении и источниках загрязнений.

Положения, выносимые на защиту.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанная модель формирования контрастов спектра ветровых волн, вызванных биогенными и нефтяными поверхностными пленками. Модель учитывает механизм нелинейной передачи энергии от длинных волн (не «чувствующих» пленки) к коротким, подверженным гасящему действию пленок. Этот механизм обеспечивает конечный уровень энергии волн в сликах, что согласуется с измерениями.
2. Феноменологическая модель формирования РЛ контрастов биогенных и нефтяных сликов. Показано, что в рамках композитной РЛ модели зеркальные отражения от нелинейных особенностей поверхности (обрушений волн) играют важную роль в формировании РЛ контрастов сликов. Поверхностные пленки гасят не только ветровую рябь, но и микро-обрушения, что объясняет значительные наблюдаемые РЛ контрасты сликов.
3. Модельные оценки РЛ контрастов нефтяных пленок различной толщины как функция скорости ветра и «геометрии» РЛ наблюдений (длина волны, поляризация, угол падения). Эти расчеты могут быть использованы для определения оптимальных параметров прототипа РЛ системы для контроля нефтяных загрязнений, и оценки условий, когда такой контроль возможен.
4. Разработанная методика восстановления скорости ветра при ограниченном разгоне ветровых волн. Эта методика обобщает широко используемый СМОД-алгоритм восстановления ветра по РЛ данным на условия ограниченного разгона ветра (прибрежная зона, полыньи и т.п.). Показано, что зависимость РЛ сигнала от разгона может быть ошибочно интерпретирована стандартными моделями как изменение скорости ветра. Результатом данной ошибки может стать недооценка скорости ветра до 150 %.

5. Разработанная модель трансформации ВПС в зонах ограниченного разгона, которая может быть использована для уточнения расчета скорости ветра в прибрежной зоне и полыньях.
6. Результаты анализа РСА изображений Баренцева моря, дающие количественные характеристики уровня текущего загрязнения моря, пространственного распределения загрязнений. Показано, что на акватории Баренцева моря имеют место регулярные утечки нефти, связанные с нефтедобывающей промышленностью. Количественные характеристики загрязнений оценены по разработанной модели.

Личный вклад автора. Результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно или на равных правах с соавторами. Автор непосредственно занимался обобщением предложенной ранее модели спектра волн и радиофизической модели морской поверхности на случай влияния биогенных и нефтяных пленок. Автор создал цифровую базу данных всех доступных экспериментов по исследованию влияния поверхностных пленок на ветровые волны и РЛ сигнал, провел их систематизацию и анализ, проводил все модельные расчеты и сопоставление с данными измерений. Автор провел модельные расчеты по проявлениям нефтяных пленок при различной «геометрии» РЛ наблюдений (длина радиоволны, поляризация, углы падения) и ветровых условий, и определил оптимальные параметры РЛ системы, позволяющей с максимальной надежностью определять количественные характеристики загрязнений. Автор лично разработал модель трансформации атмосферного погранслоя слоя в прибрежной и прикромочной областях, участвовал в разработке алгоритма восстановления ветра при условиях ограниченного разгона волн, и внедрении этого алгоритма в эмпирическую радиолокационную функцию типа СМОД. Автору лично принадлежат все результаты по обработке и анализу РСА изображений, включая результаты по идентификации нефтяных загрязнений в Баренцевом море и определении их количественных характеристик.

Апробация работы.

Результаты работы были представлены на Международном Симпозиуме Стран СНГ «Атмосферная радиация» (Санкт-Петербург, Россия, 2006 г.), Исследовательском Семинаре: Норвежско-Российское сотрудничество на Свальбарде в Норвежском Полярном Институте (Тромсо, Норвегия, 2006 г.), Конференции «Полярная Динамика» (Берген, Норвегия, 2007 г.), ежегодных аспирантских сессиях Международного Центра по Окружающей Среде и Дистанционному Зондированию (Санкт-Петербург, Россия, 2005, 2006, 2007 гг.),

Международной Летней Школе «Климат Высоких Северных Широт» (Санкт-Петербург, Россия, 2007), докладах в Центре по Окружающей Среде и Дистанционному Зондированию (Берген, Норвегия, 2005, 2006 гг.), докладе в Гамбургском Университете (Гамбург, Германия, 2006 г.).

В полном объеме диссертация обсуждалась на заседании кафедры Промысловой Океанологии и Охраны Прибрежных Вод РГГМУ (ноябрь 2007 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 работ, из них одна в рецензируемом издании и один препринт.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы, содержащего наименований. Общий объем работы составляет страниц и содержит кроме основного текста рисунков и таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава содержит обзор теоретических и экспериментальных работ, связанных с исследованиями морских поверхностных загрязнений по данным радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). По результатам анализа данных работ были сделаны следующие выводы.

Использование РСА для выявления нефтяных загрязнений из космоса, а также определения их характеристик, является крайне перспективным, так как эти приборы имеют высокое пространственное разрешение широкую полосу обзора, а также дают возможность наблюдать морскую поверхность не зависимо от погоды и времени суток. Существующие в настоящее время РСА (C-band ENVISAT, X-band TERRA, C-band RADARSAT, L-band ALOS) работают на различных длинах волн и поляризациях, что позволяет комбинировать РЛ сигналы и расширять, таким образом, возможности исследования.

Рассеяние радиоволн на морской поверхности происходит согласно двум основным механизмам: (а) зеркальное отражение, когда происходит обратное отражение радиоволн от «зеркальных» точек поверхности, которое наиболее эффективно при углах падения θ менее 20 градусов; (б) брэгговское или резонансное рассеяние от спектральных компонент ветровых волн с волновым числом $2k_R \sin \theta$, которое эффективно при умеренных и больших углах падения. Эти два механизма формируют рассеяние с «регулярной» поверхности. Для полноценного

описания рассеяния необходимо также учитывать зеркальное отражение от «нерегулярных» участков поверхности, то есть участков поверхности, связанных с обрушениями ветровых волн.

Радиолокационное рассеяние определяется через спектр ветровых волн. В данной работе в качестве модели спектра волн используется модель, предложенная в работе [Kudryavtsev and Johannessen, 2004; Kudryavtsev *et al.*, 2005]. Этот спектр определяется как решение уравнения баланса энергии волн, который включает следующие источники и стоки: приток энергии от ветра, приток и потеря энергии за счет резонансных нелинейных межволновых взаимодействий, приток энергии за счет генерации коротких волн обрушениями более длинных волн, потери энергии за счет вязкой диссипации и обрушения волн. Схематично источники и стоки волновой энергии изображены на рис. 1, где k – волновое число.

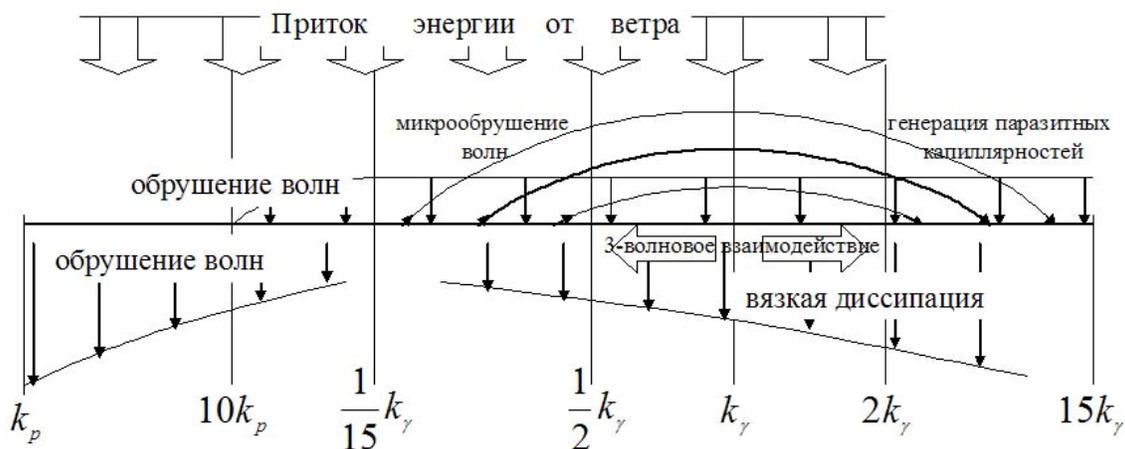


Рис. 1. Схематическое распределение источников/стоков энергии по спектру.

$k < 10k_p$ - низкочастотный участок: гравитационные волны;

$k > 10k_p$ - равновесный участок: $10k_p < k < k_\gamma$ - гравитационно-капиллярные волны, $k > k_\gamma$ - капиллярные волны.

Скорость ветра является одной из ключевых характеристик при исследовании морских поверхностных загрязнений, поскольку она определяет спектр волн, его контраст, вызванный пленкой, и соответствующий контраст РЛ сигнала. Таким образом, особое значение приобретает задача восстановления поля ветра по данным РСА. Для ее решения широко используются модели типа СМОД, однако, они применимы для открытого океана, а для зон ограниченного разгона (прибрежной, прикромочной зон и полыней) требуется иной подход.

Поверхностные загрязнения моря могут быть представлены биогенными пленками (мономолекулярными) и пленками нефти и нефтепродуктов, которые, как правило, являются пленками конечной толщины. Влияние поверхностных пленок на волны осуществляется за счет

увеличения коэффициента гашения волн. Теория для коэффициентов гашения волн бесконечно тонкими поверхностными пленками и пленками конечной толщины развита в работах Левича (1962) и Jenkins and Jakobs (1997). Эти коэффициенты определяют скорость вязкой диссипации энергии, которая является одним из элементов уравнения баланса энергии ветровых волн. Коэффициент затухания волн имеет максимум на определенном волновом числе, зависящем от упругости пленки, т.е. гашение волн имеет избирательный характер, что обусловлено квазирезонансным характером возбуждения вихревой компоненты гравитационно-капиллярной волны (“вынужденной волны Марангони”), определяющей затухание последней.

В данной главе также приводится обзор и систематизация экспериментальных данных, полученных в лабораторных и натуральных условиях, по исследованию контрастов спектра ветровых волн и РЛ контрастов, вызванных нефтяными и квазибиогенными пленками. Общей особенностью экспериментальных данных является значительный разброс измеренных контрастов. Более того, измерения контрастов, проведенные одними и теми же методами с одинаковыми веществами и при эквивалентных ветровых условиях, также демонстрируют значительный разброс. Тем не менее, общая закономерность, установленная экспериментально – это рост спектрального контраста с уменьшением длины волны, и уменьшение контраста с увеличением скорости ветра.

Во второй главе представлены результаты модельных исследований влияния поверхностных пленок (бесконечно тонких и конечной толщины) на спектр ветрового волнения и РЛ сигнал.

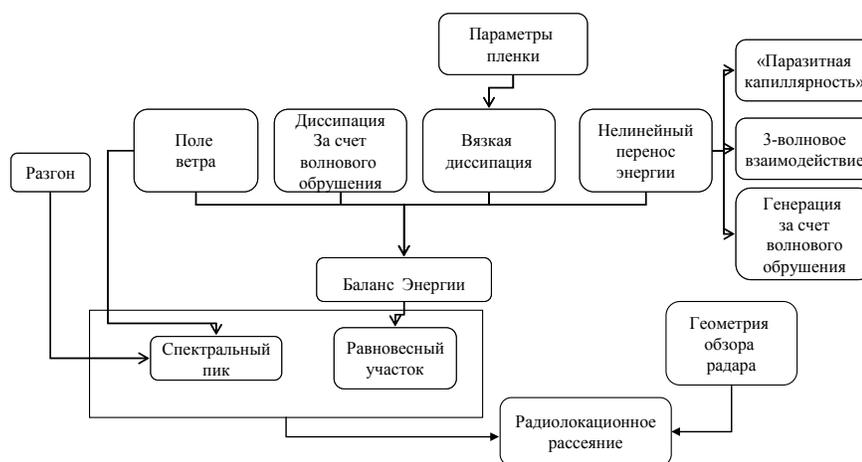


Рис.2. Схема радиофизической модели морской поверхности.

Данная работа основана на модели спектра волн, созданного изначально не для моделирования пленок, а для иных приложений, связанных с проблемами радиолокационного зондирования морской поверхности (Kudryavtsev *et al.*, 2005). Применение этого спектра к проблеме сликов связано с модификацией коэффициента гашения волн в соответствии с теориями Левича (для тонких пленок) и Дженкинса-Якобса (пленки конечной толщины). Используемый здесь спектр учитывает механизм нелинейной передачи энергии от длинных волн к коротким, что имеет принципиальное значение для моделирования спектральных контрастов сликов. В этом случае нелинейная «накачка» энергии от длинных волн (не «чувствующих» пленки) в область коротких волн (подверженных гасящему воздействию пленок) обеспечивает конечный уровень энергии волн в сликах, наблюдаемый экспериментально.

На рис. 2 представлена схема радиофизической модели морской поверхности, где входными параметрами, в частности, являются скорость ветра и параметры пленки. При известных статистических характеристиках морской поверхности, рассеяние радиоволн (УЭПР, σ_0^p) рассчитывается в рамках композитной модели, объединяющей рассеяние радиоволн на «регулярной» поверхности (2-х масштабное брэгговское рассеяние, σ_{0br}^p и зеркальные отражения, σ_0^{sp}) и зеркальные отражения от нелинейных особенностей поверхности (обрушений волн, σ_0^{wb})

$$\sigma_0^p = \sigma_{0br}^p + \sigma_0^{sp} + \sigma_0^{wb} q, \quad (1)$$

где q - доля поверхности, покрытая зонами обрушений

Влияние пленки на ветровые волны (и, следовательно, на РЛ сигнал) учитывается путем замены молекулярного коэффициента вязкости на эффективный коэффициент гашения волн по модели Левича (тонкие биогенные пленки) или модели Дженкинса-Якобса (нефтяные пленки конечной толщины). Параметры исходной модели Дженкинса-Якобса (межфазные упругости, поверхностные натяжения, вязкость нефти) были модифицированы на основании экспериментов и рекомендаций группы ученых ИАП РАН под руководством С. Ермакова. Тестирование модели коэффициента гашения волн по данным лабораторного эксперимента с пленками нефтепродуктов различной толщины показало хорошее соответствие (рис. 3).

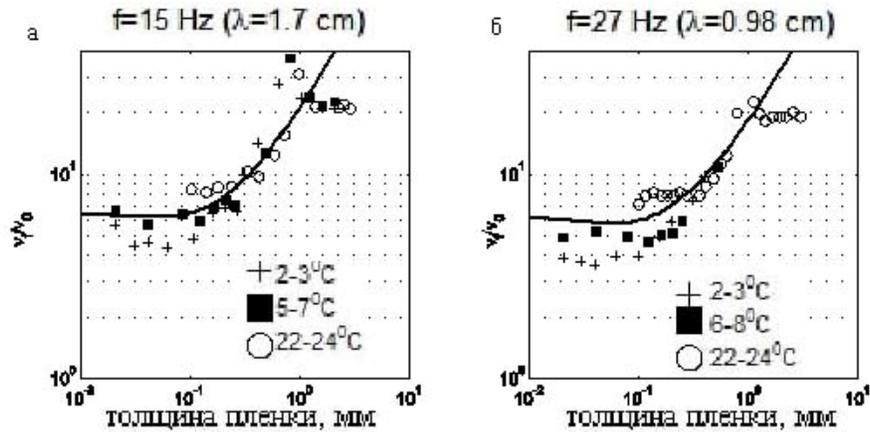


Рис. 3. Отношение коэффициента гашения поверхностных волн (ν_f) с частотой 15 Гц (а) и 27 Гц (б) нефтяной пленкой различной толщины к коэффициенту гашения волн на чистой воде ν_0 . Символы – лабораторные измерения (Ермаков и др. 2003) при различных значениях температуры воды, сплошные линии – расчет по модели Дженкинса-Якобса.

На рис. 4 представлены спектральные контрасты снимков для пленок трех типов веществ, полученных в ходе экспериментов ИАП РАН (символы) и расчета по модели (кривые). Упругость естественных биологических пленок лежит в диапазоне $E = 12-30$ мН/м, поэтому эти данные, в частности, иллюстрируют возможное отличие спектральных контрастов ветровых волн, вызванных естественными и искусственными загрязнениями. Спектральное поведение контраста для исследуемых веществ в диапазоне см-дм волн сильно различается, что, в первую очередь, обусловлено спектральным ходом эффективных коэффициентов гашения. Измерения показывают, что, в отличие от «естественных» пленок, тонкие нефтяные пленки не могут быть идентифицированы радиолокаторами L- и С- диапазона, за исключением, вероятно, условий очень слабых ветров. Модельные расчеты, представленные на рис. 4 вполне удовлетворительно воспроизводят измерения, как по величине контраста, так и по его форме. Разброс экспериментальных данных типичен для оценок контрастов снимка; в пределах снимка величина контраста весьма неоднородна и варьируется в пределах порядка своей величины.

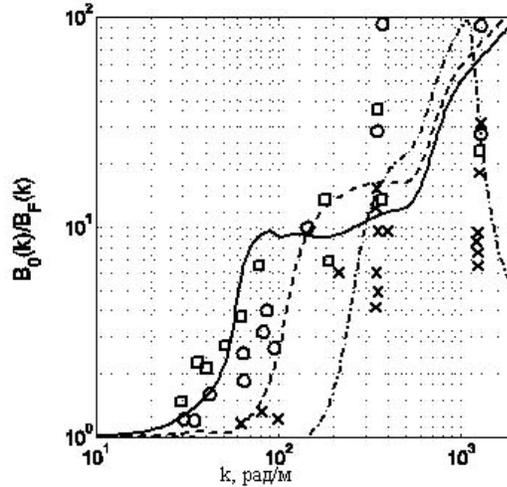


Рис. 4. Экспериментальные оценки спектрального контраста для слика квазибиогенного вещества (квадраты), растительного масла (кружки) и сырой нефти (крестики) при скоростях ветра 6-7 м/с (Ермаков и др., 2003). Кривые – расчеты по модели для пленок с упругостями 25 мН/м (квазибиогенное вещество, сплошная линия), 12 мН/м (растительное масло, штрих) и 4 мН/м (тонкая пленка сырой нефти, штрих-пунктир) при скорости ветра 6,5 м/с.

Так как модель способна качественно воспроизводить данные наблюдений, то целесообразно использование ее для оценки возможных контрастов спектра ветровых волн (и в последующем – для оценки РЛ контрастов), вызываемых пленками нефти различной толщины (рис. 5).

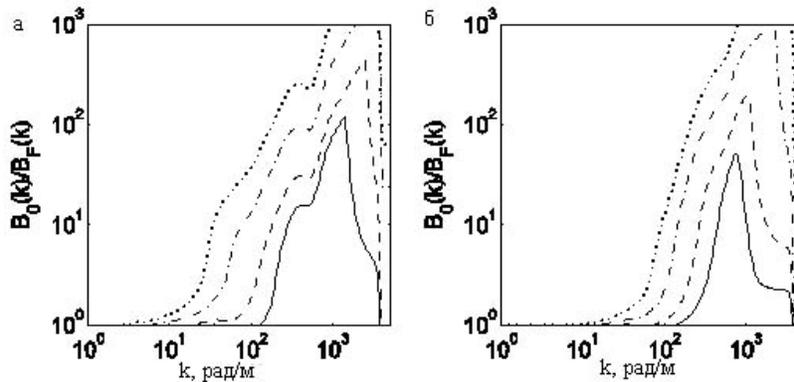


Рис. 5. Контрасты спектра ветровых волн. Нефтяная пленка толщиной 0,01 мм (сплошные), 0,5 мм (штрих), 2 мм (штрих-пунктир) и 5 мм (пунктир). Скорость ветра: 5 м/с (а) и 10 м/с (б).

Коэффициент гашения волн пленками нефти с $d < 0,1$ мм не зависит от ее толщины. Примечательным результатом расчетов является то, что даже тонкие нефтяные пленки обеспечивают значительные контрасты спектра капиллярных волн, которые не исчезают при сильном ветре (10 м/с). При $d > 0,1$ мм спектральные контрасты нарастают и смещаются в

длинноволновую область. Однако, значения контраста > 100 вряд ли имеют практический интерес, т.к. они неизбежно будут находиться на уровне шумов аппаратуры. В то же время смещение контраста в длинноволновую область по мере увеличения толщины пленки показывает, например, что РСА С-диапазона «чувствуют» пленки с $d > 0,1$ мм, и могут быть использованы для оценки их толщины.

На рис. 6 приведено сравнение модельного РЛ контраста с экспериментальными данными. Данные измерений демонстрируют ожидаемый тренд, когда величина РЛ контраста слика увеличивается с уменьшением длины волны и уменьшением скорости ветра.

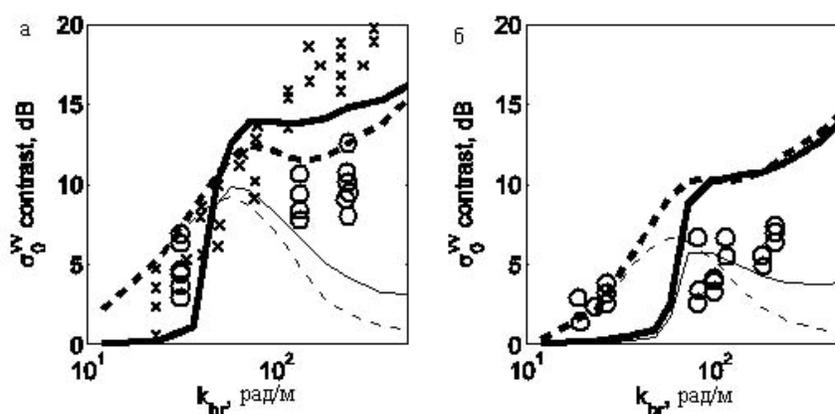


Рис. 6. РЛ контрасты морской поверхности, вызванные пленкой квазибиогенного вещества ($E = 25$ мН/м) при условиях: (а) скорость ветра 5 м/с и $\theta = 35^\circ$, (б) скорость ветра 7 м/с и $\theta = 31^\circ$. Символы «о» – измерения РСА в L-С-Х- диапазонах, а символы «х» - РЛ измерения в L-S-С-Х-Ку диапазонах, проведенные с борта вертолета одновременно с РСА (Gade et al., 1998). Модельные расчеты показаны сплошными (облучение «на ветер») и штриховыми (облучение «перпендикулярно ветру») линиями. Толстые линии одного стиля – расчеты по полной модели (1), а тонкие линии – расчет по модели, когда влияние обрушений волн на УЭПР в зоне слика не учитывается («феноменологическая модель»).

Диапазон контрастов, предсказываемый моделью для направлений по- и перпендикулярно направлению ветра, в целом согласуется с данными наблюдений в L- и С-диапазонах ($k_{br} < 10^2$ рад/м). В X- и Ку- диапазонах модельные оценки заметно меньше наблюдаемых контрастов.

Занижение оценок РЛ контрастов для коротких радиоволн обусловлено предположением, что обрушения волн не подвержены воздействию пленками загрязнений. В этом случае, при почти полном подавлении брэгговских волн, значительная часть РЛ сигнала обеспечивается отражениями от обрушений волн. Однако, в последнее время появились экспериментальные

доказательства того, что поверхностные пленки гасят не только короткие волны, но и обрушения дециметровых волн (Малиновский, персональное сообщение). По данным этих измерений, интенсивность обрушений волн в области слика уменьшалась в 2-3 раза по сравнению с чистой поверхностью. Одним из возможных объяснений этого экспериментального факта может являться то, что поверхностные пленки препятствуют росту супер-гармоник несущей волны, порождающих ее неустойчивость и последующее обрушение. Для того чтобы учесть этот экспериментальный факт, в работе предложена «феноменологическая» РЛ модель, в которой предполагается, что поверхностные пленки подавляют обрушения коротких волн и, тем самым, исключают их вклад в РЛ сигнал (последний член в правой части (1) исчезает). В этом случае РЛ контраст слика определяется выражением

$$C_{\sigma} = (\sigma_{0br}^p + \sigma_0^{sp} + \sigma_0^{wb} q)_0 / (\sigma_{0br}^p + \sigma_0^{sp})_F, \quad (2)$$

где характеристики чистой поверхности и в области слика рассчитываются на основе спектра волн. Расчеты РЛ контрастов по «феноменологической» модели представлены на рис.6 толстыми линиями, которые дают существенно лучшее соответствие данным измерений. На рис. 7 представлен пример модельного расчета РЛ контраста нефтяных пленок различной толщины для двух значений скорости ветра.

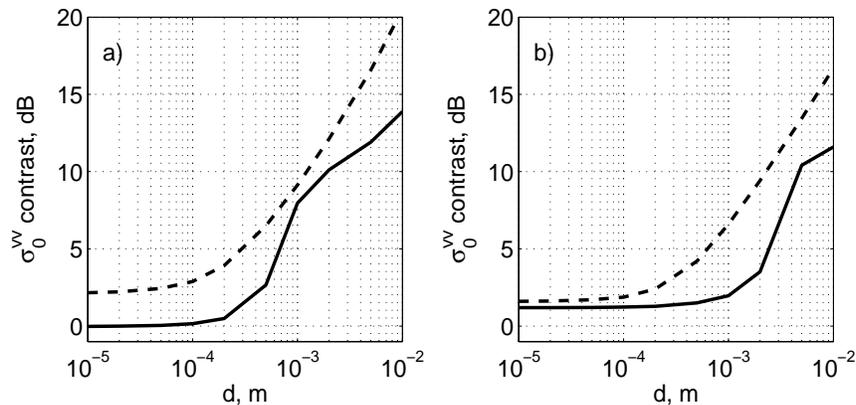


Рис.7. Оценки РЛ контрастов (С-диапазон, ВВ поляризация, $\theta = 30^0$) для нефтяной пленки различной толщины при скоростях ветра 5 м/с (а) и 10 м/с (б) при наблюдении «на ветер» (сплошные линии) и «перпендикулярно ветру» (штрих).

На рис.8 представлено РСА изображение нефтяного разлива, произошедшего при катастрофе танкера «Престиж». Разработанная модель была использована для оценки толщины нефтяного разлива в 5 точках, отмеченных на этом рисунке. Расчеты показали следующие толщины пленок, мм: 0,370; 0,410; 0,435; 0,445; 0,450 для точек 5 – 1 соответственно.

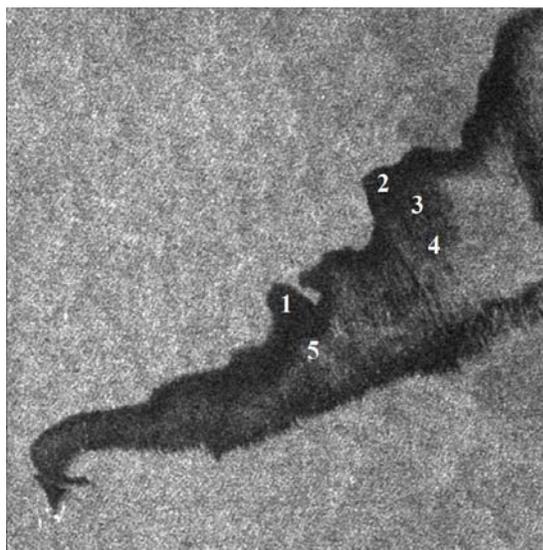


Рис. 8. Фрагмент РСА изображения (© ESA).

Угол между направлением визирования радара и направлением ветра 45° , $\theta = 30,9^{\circ}$,
 $u = 6,5 \text{ м/с}$, VV – поляризация.

Третья глава представляет результаты исследований РЛ рассеяния загрязненной поверхности моря в условиях ограниченных разгонов ветровых волн, - в прибрежной/прикромочной зоне и полыньях.

Специфика ветрового режима вблизи берегов и льда определяется изменением свойств подстилающей поверхности. Наиболее перспективным для целей картирования детальных особенностей поля ветра в таких условиях является определение поля ветра на основе спутниковых РСА изображений. При ограниченных разгонах ветра параметры морской поверхности могут существенно отличаться от полностью развитого волнения, что, в свою очередь, приведет к дополнительной зависимости УЭПР от стадии развития ветрового волнения. На рис. 9 показана зависимость параметров морской поверхности от разгона ветра.

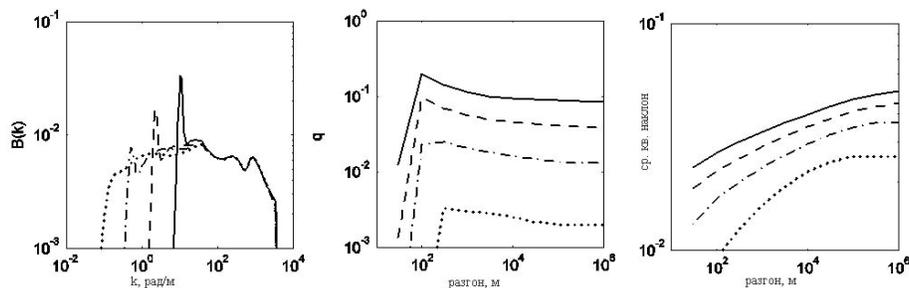


Рис.9. Слева: спектр кривизны ветровых волн при $u_{10}=10$ м/с . $X = 10^2$ м (сплошная линия), $X = 10^3$ м (штрих), $X = 10^4$ м (штрих-пунктир), и $X = 10^5$ м (пунктир). Посередине: доля поверхности моря покрытой зонами обрушений q . 5 м/с (пунктир), 10 м/с (штрих-пунктир), 15 м/с (штрих) и 20 м/с (сплошная линия). Справа: среднеквадратичный наклон $s_{up}^2 + s_{cr}^2$.

Как следует из этого рисунка, удаление от берега (разгон) полностью определяет форму спектра энергонесущих волн, а коротковолновый интервал спектра (равновесный интервал, к которому относятся брэгговские волны) зависит только от скорости ветра, и не зависит от разгона. При разгонах волн, имеющих практический интерес ($> 10^2$ м) обрушения волн несколько уменьшаются с увеличением разгона, но, т.к. их роль в формировании УЭПР на ВВ-поляризации невелика, этот эффект не будет существенно влиять на поведение РЛ сигнала с удалением от берега. Расширение спектрального диапазона ветровых волн с увеличением разгона (за счет продвижения спектрального пика в область низких частот) приводит к росту среднеквадратичного наклона поверхности. Наряду с этим, наклоны поверхности становятся изотропными, т.к. угловая ширина спектра волн расширяется по мере их развития. Таким образом, можно ожидать, что влияние степени развития волн на УЭПР проявится при малых углах падения, когда вклад зеркальных отражений (зависящих от среднеквадратичного наклона морской поверхности) в УЭПР значителен.

Эмпирические модели типа CMOD являются основным инструментом для восстановления и картирования поля ветра, однако они применимы для восстановления поля ветра в открытом океане. В связи с этим предложена коррекция стандартных моделей, учитывающая особенности рассеяния радиоволн на морской поверхности при различных стадиях развития ветрового волнения. На рис. 10 показана ошибка восстановления скорости ветра при не учете этого фактора для угла падения $\theta = 20^\circ$ и азимуте измерения «на ветер» и «перпендикулярно ветру». Ошибка восстановления ветра определена как

$$Error = \left[u(\sigma_0, X) - u^\infty(\sigma_0) \right] / u^\infty(\sigma_0), \quad (3)$$

где $u^\infty(\sigma_0)$ - скорость ветра соответствующая оригинальной модели CMOD-5 для заданного значения УЭПР σ_0 , а $u(\sigma_0, X)$ - скорость ветра соответствующая тому же значению УЭПР σ_0 , но для скорректированной модели CMOD-5 при разгоне X . При малых удалениях от берега ошибки могут достигать значительных величин, выходящих за разумные представления о точности восстановления ветра по РЛ данным.

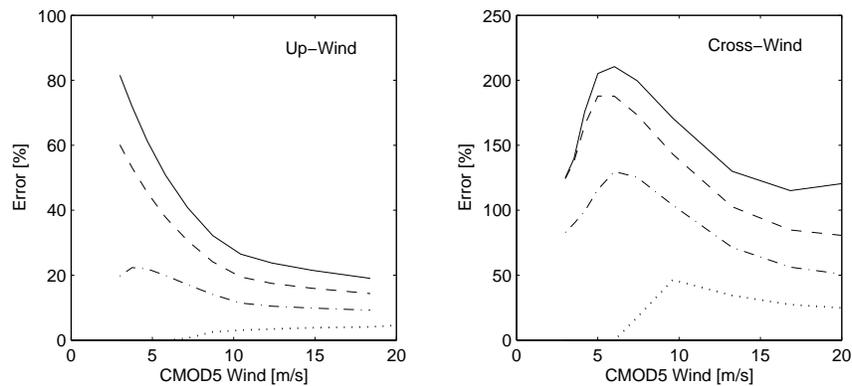


Рис. 10. Оценка ошибки РЛ восстановления скорости ветра по модели CMOD-5 при угле падения $\theta = 20^\circ$ и азимуте наблюдения «на ветер» (левый рисунок) и «перпендикулярно ветру» (правый рисунок) при различных разгонах волн от берега: 10^2 м (сплошная), 10^3 м (штрих), 10^4 м (штрих-пунктир), 10^5 м (пунктир).

В качестве примера, на рис. 11 приведено сопоставление результатов восстановления скорости ветра по оригинальной модели CMOD-5 и по скорректированной модели, учитывающей ограниченные разгоны ветра.

В качестве исходных данных были взяты значения УЭПР по сечению РСА изображения. Углы падения вдоль сечения изменялись от $18,5$ до $29,5$ град., т.е. влияние разгона волн на восстановление скорости ветра должны быть существенными. При малых удалениях от берега ($X < 100$ км) значения скорости ветра по скорректированной модели существенно отличаются от результатов восстановления по исходной модели CMOD-5 (на величину до 3-х м/с). Более того, уточненные расчеты не показывают монотонного увеличения скорости ветра по мере удаления от берега, как это следует из исходной модели. Последнее, по-видимому, является артефактом, так как модель CMOD-5 верифицирована на данных открытого моря и не учитывает влияние эффектов развития ветрового волнения на рассеяние радиоволн.

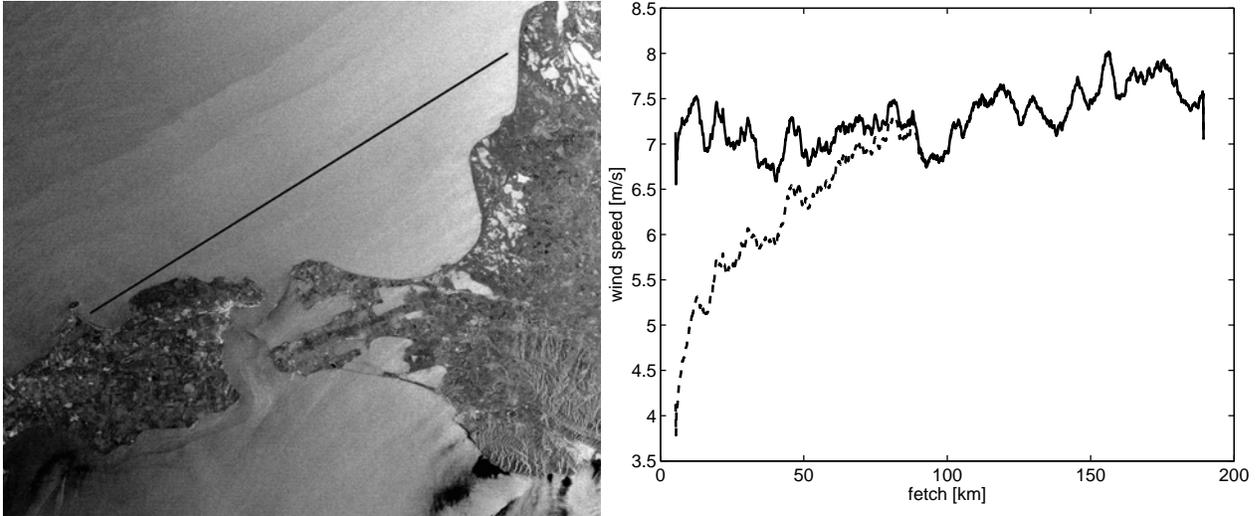


Рис. 11. Слева: фрагмент РСА изображения района Керченского пролива (© ESA). Линия указывает положение сечения изображения, по которому проведено восстановление скорости ветра, представленное на рисунке справа. Справа: результат восстановления скорости ветра вдоль сечения РСА по оригинальной модели СМОД-5 (штриховая линия) и по скорректированной модели, учитывающей ограниченные разгоны ветра (сплошная линия).

Для более точного расчета спектра ветровых волн в зонах ограниченного разгона может быть также учтен эффект трансформации внутреннего пограничного слоя (ВПС) атмосферы, который выражается в усилении ветра при пересечении воздушной массой границы берег-вода или лед-вода в связи с уменьшением шероховатости и типа подстилающей поверхности. Разработанная модель трансформации ВПС основана на решении системы уравнений, описывающих воздушный поток, включающих уравнение движения, переноса тепла, неразрывности, а также замыкание системы через коэффициент турбулентного обмена: $k = l\sqrt{b}$, где l - длина пути смешения, а b - энергия турбулентности, определяемая из уравнения ее баланса (гипотезы замыкания Колмогорова-Прандтля). Модель включает функцию стратификации атмосферы, что позволяет учесть температурный эффект при расчете поля ветра, который может играть важную роль в некоторых случаях, например, когда холодный воздух с поверхности льда выходит на относительно теплую поверхность воды.

Четвертая глава посвящена анализу РСА изображений, которые были предварительно подобраны в результате работы с базой изображений ESA (European Space Agency).

Отобраны и представлены РЛ изображения Баренцева моря с примерами наличия поверхностных загрязнений в виде как биогенных, так и нефтяных пленок, трансформации ВПС для случаев, когда ветер дует с суши и поверхности льда на море, следствий неустойчивой

стратификации приводного слоя атмосферы,. Из 560 просмотренных РСА изображений на 22 изображениях визуально обнаружены нефтяные загрязнения. Для каждого из этих случаев определены количественные характеристики сликов, условия их наблюдения (ветер, его направление, угол падения радиоволн) и возможные источник загрязнений, а также проведены соответствующие модельные расчеты. Определены следующие источники нефтяных сликов: терминал по перегрузке нефти рядом с входом в Кольский залив; утечки с кораблей по ходу их движения; разливы (пятна) образовавшиеся в результате аварий; утечки при нефтедобыче. Площадь обнаруженных РСА сликов изменяется в пределах от 0,05 до 9,55 км² со средним значением 2,5 км². На рис.12 представлены наблюдаемые контрасты нефтяных сликов в зависимости от скорости ветра. Углы падения для условий наблюдения сликов находились в пределах от 24 до 40 градусов. На этом же рисунке представлен расчет модельных контрастов для толщины пленки 0,35 мм и для двух направлений облучения (против ветра и перпендикулярно ветру), которые перекрывают наблюдаемый диапазон направления облучения по отношению к направлению ветра.

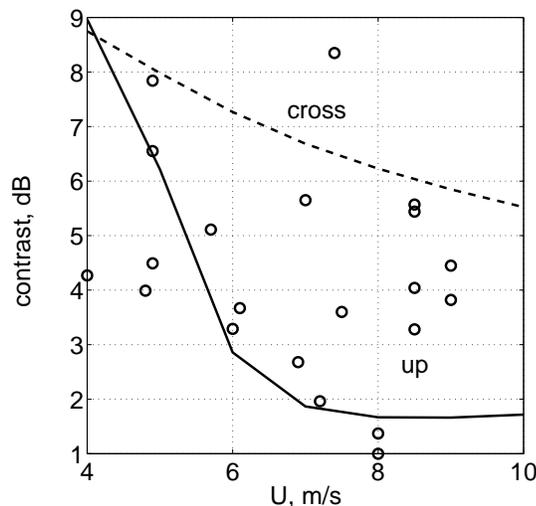


Рис. 12. Наблюдаемые РСА контрасты нефтяных сликов на Баренцевом море (o) и модельный расчет для пленки нефти толщиной 0,35 мм для направления облучения «против ветра» (сплошная) и «перпендикулярно ветру» (штрих).

Толщина пленки была подобрана так, чтобы наблюдаемые контрасты находились внутри модельных расчетов. В этом смысле, толщина пленки 0,35 мм является диагностической оценкой средней толщины наблюдаемых разливов нефти. При средней площади слика 2,5 км²

и толщине пленки 0,35 мм, средний объем разлива в Баренцевом море за исследуемый период составил 875 м^3 , что эквивалентно примерно 790 тонн. Для примера, авария танкера «Престиж» привела к разливу 77 тыс. тонн, то есть средняя утечка нефти в Баренцевом море составляет примерно 1 сотую такой катастрофы.

В заключении представлены основные результаты проведенного исследования.

Разработана модель влияния биогенных и нефтяных поверхностных пленок на спектр коротких ветровых волн. Эта модель основана на модели спектра волн, созданного изначально не для моделирования пленок, а для иных приложений, связанных с проблемами радиолокационного зондирования морской поверхности (Kudryavtsev and Johannessen, 2004; Kudryavtsev *et al.* 2005). Применение этого спектра к проблеме сликов связано с модификацией коэффициента гашения волн в соответствии с теориями Левича (1962) и Jenkins and Jakobs (1997). Используемый здесь спектр учитывает механизм нелинейной передачи энергии от длинных волн к коротким, что имеет принципиальное значение для моделирования спектральных контрастов сликов. В этом случае нелинейная «накачка» энергии от длинных волн (не «чувствующих» пленки) в область коротких волн (подверженных гасящему воздействию пленок) обеспечивает конечный уровень энергии волн в сликах, наблюдаемый экспериментально.

Предложенная модель формирования контрастов спектра волн в сликах показала, в целом, качественное согласие с экспериментальными данными как по величинам контрастов спектра волн, так и их зависимости от волнового числа и ветра.

Простое отождествление спектральных контрастов с РЛ контрастами (что было бы справедливо в рамках брэгговской теории рассеяния) не является очевидным. Даже в рамках классической композитной модели зеркальные отражения, являясь относительно малыми, но не подверженными воздействию пленок, могут играть важную роль в формировании РЛ контрастов сликов, когда спектр брэгговской ряби сильно подавлен поверхностными пленками.

Обрушения ветровых волн так же влияют на УЭПР морской поверхности, и этот механизм учтен в рассматриваемой здесь РЛ модели. При умеренных углах падения вклад обрушений волн в УЭПР существенно меньше брэгговского рассеяния. Однако, при подавлении брэгговских волн, роль отражений радиоволн от обрушивающихся волн (если они не подвержены воздействию пленок) становится доминирующей, и этот фактор должен приводить к меньшим РЛ контрастам по сравнению с теми, которые следуют из брэгговской теории.

Однако сопоставление модельных расчетов с данными РЛ измерений показало, что модельные РЛ контрасты сликков существенно меньше наблюдаемых. Одним из возможных объяснений причин этого явного расхождения является то, что обрушения волн (по крайней мере, обрушения коротких ветровых волн) также подавляются поверхностными пленками. Это явление было подтверждено экспериментально (Малиновский, 2007, персональное сообщение).

Мы учли этот эффект в «феноменологической» модели формирования РЛ контрастов слика, полагая, что вклад обрушений волн в РЛ отражения существует на чистой поверхности, но исчезает в зоне слика. Эта модификация позволила заметно улучшить соответствие модели РЛ контрастов слика данным измерений. Однако вопрос о том, насколько это соответствует реальной физике формирования особенностей РЛ сигнала в зоне слика – остается открытым.

Проведено исследование зависимостей РЛ контрастов морской поверхности, покрытой нефтяными и биогенными пленками, от скорости ветра, условий РЛ наблюдения, а также толщины пленки. Установлены оптимальные условия РЛ наблюдений нефтяных и биогенных пленок с целью их различения.

Исследованы пространственные распределения скорости ветра, волн, а также РЛ сигнала в областях с ограниченным разгоном ветра (прибрежная и прикромочная зоны, полыньи). Показало, что величина разгона оказывает значительное влияние на эти характеристики. Предложена методика восстановления скорости ветра по РЛ данным в зонах ограниченного разгона. Разработанный алгоритм объединен со стандартным алгоритмом восстановления ветра по РЛ данным (СМОД алгоритм), который изначально был создан для условий открытого моря. Показано, что не учет эффекта разгона при восстановлении скорости ветра может приводить к значительным ошибкам восстановления, достигающим 150%.

Достоверная оценка скорости ветра по РЛ данным необходима для дальнейших оценок количественных характеристик поверхностных загрязнений (тип загрязнения, толщина пленки, поверхностная концентрация, объем поверхностного вещества), идентифицируемых на РСА изображениях в виде темных контрастных зон.

Разработана модель трансформации ВПС. Учет трансформации в зонах ограниченных разгонов может быть использован как уточнение методов восстановления поля ветра, что будет сказываться на результатах расчетов РЛ рассеяния.

Выполнен анализ 560 РСА изображений (полученных со спутника ENVISAT) Баренцева моря (период май – сентябрь 2007) нацеленный на идентификацию нефтяных загрязнений и

определения их количественных характеристик. За анализируемый период выявлено 22 случая искусственных нефтяных загрязнений. Площадь исследуемых сликов изменялась от 0,05 до 9,55 км² со средним значением 2,5 км². Установлено, что наибольшие по площади нефтяные слики наблюдаются возле перегрузочного терминала у входа в Кольский залив и платформы Варандей. Разработанная модель использована для моделирования наблюдаемых РЛ контрастов нефтяных разливов и диагностической оценки их толщины. Показано, что в среднем толщина пленки в нефтяных разливах имеет величину 0,35 мм. Таким образом, при средней площади слика 2,5 км² и толщине пленки 0,35 мм, средний объем разлива в Баренцевом море за исследуемый период составил 875 м³, что эквивалентно примерно 790 тонн. Для примера, авария танкера «Престиж» привела к разливу 77 тыс. тонн, то есть средняя утечка нефти в Баренцевом море составляет примерно 1 сотую такой катастрофы.

В **Приложении** представлены соотношения эмпирической модели СМОД.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. *Кудрявцев В., Иванова Н., Йоханнесен О., Акимов Д.* Об особенностях РЛ изображений прибрежной зоны моря // Исследование Земли из Космоса. 2007. № 6. С. 1 – 11.
2. *Кудрявцев В.Н. Иванова Н. А., Гуцин Л. А.* Оценка контрастов спектра ветровых волн в сликах, вызванных биогенными и нефтяными пленками // Препринт, ИПФ РАН, Нижний Новгород. 2008. 34 с. (в печати)
3. *Иванова Н. А., Кудрявцев В. Н., Акимов Д. Б.* Оценки радиолокационных контрастов поверхностных загрязнений моря // Международный Симпозиум Стран СНГ «Атмосферная радиация». Санкт-Петербург. 2006
4. *Ivanova N. A.* Radar imaging of sea surface at marginal ice zone and leads in Barents and Kara seas // Proceedings of the Research Seminar: Norwegian-Russian collaboration in Svalbard. Norwegian Polar Institute. Tromsø, Norway. 2006
5. *Ivanova N., Kudryavtsev V., Akimov D.* Surface contaminations of the northern seas from synthetic aperture radar data: detection, properties // Proceedings of Polar Dynamics: Monitoring, Understanding and Prediction Conference. Bergen, Norway. 2007