

Министерство Образования РФ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЦЕНТР ПО ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ И
ДИСТАНЦИОННОМУ ЗОНДИРОВАНИЮ ИМ.НАНСЕНА

на правах рукописи
УДК 551.465:621.396.969

Акимов Дмитрий Борисович

ПРОЯВЛЕНИЕ МЕЗОМАСШТАБНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОКЕАНА НА
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Специальность 25.00.28 — океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2003

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете и Международном центре по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена

Научный руководитель

доктор физико-математических наук

Кудрявцев В.Н.

Официальные оппоненты

доктор физико-математических наук

Лавренов И.В.

кандидат физико-математических наук

Гогоберидзе Г.Г.

Ведущая организация

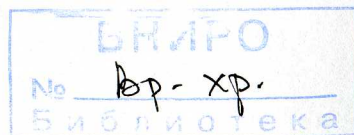
Федеральное государственное унитарное предприятие

Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт экономики, информации и автоматизированных систем управления рыбного хозяйства (Москва)

Защита диссертации состоится 13 марта 2003 г. в 14 час. 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 « » февраля 2003 г.



Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат географических наук

Воробьев В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Радиолокационные (РЛ) методы являются одним из наиболее эффективных методов дистанционного исследования океана из космоса. Их основные достоинства — это низкая удельная себестоимость данных, возможность регулярного мониторинга выбранных районов при любых атмосферных условиях и в любое время суток. Современные РЛ станции имеют пространственное разрешение в несколько десятков метров, что приближается к пространственному разрешению оптических методов. Другой уникальной особенностью РС станций является их высокая чувствительность, т.е. способность регистрировать малые изменения в характеристиках ветрового волнения, что дает возможность их применения для исследований особенностей поля ветра в открытом океане и прибрежной зоне, определения характеристик поля ветрового волнения, идентификации зон поверхностных загрязнений. Одно из важных и, на данный момент, недостаточно развитых направлений — это определение характеристик поля поверхностных течений (связанных с различными динамическими явлениями в море) по данным РЛ зондирования. Эта проблема имеет исключительную прикладную значимость, в частности, для повышения эффективности рыбного промысла и обеспечения безопасности надводного и подводного мореплавания.

Мощность РЛ сигнала, рассеянного морской поверхностью, определяется степенью ее «шероховатости». Поэтому, динамические явления в верхнем слое моря он может «видеть» только лишь через их воздействие на характеристики ветрового волнения. Качественные описания механизмов РЛ проявлений предложены практически для всех типов динамических процессов, регистрируемых РЛ методами. Однако, разработанные к настоящему времени модели, как правило, не способны воспроизвести на количественном уровне наблюдаемые РЛ контрасты. Разработка усовершенствованных моделей проявления мезомасштабных динамических процессов на РЛ изображениях является одним из актуальных направлений современной спутниковой океанологии.

Цель работы

Основной целью работы является разработка усовершенствованной модели проявления мезомасштабных динамических процессов в океане (таких как фронтальные зоны, вихри и меандры, границы струйных течений, зоны конвергенции/дивергенции течений, внутренние волны) на РЛ изображениях, полученных при горизонтальной (ГГ) и вертикальной (ВВ) поляризациях, произвольных угле падения и длине радиоволны (микроволнового диапазона) и при различных ветроволновых условиях.

Задачи исследования

- Разработать усовершенствованную модель трансформации спектра ветровых волн и их обрушений в неоднородной среде, учитывающую поверхностные те-

чения, наличие плёнок поверхностно-активных веществ (ПАВ) и переменное поле ветра, являющееся результатом приспособления атмосферного погранслоя (АПС) к неоднородностям температуры морской поверхности.

- Обобщить известные модели рассеяния радиоволн на морской поверхности для создания универсальной модели, применимой для произвольных углов падения радиоволн и их поляризации, а так же учитывающей влияние обрушений ветровых волн на РЛ сигнал.
- Оценить роль основных механизмов рассеяния радиоволн (резонансное рассеяние, зеркальные отражения, рассеяние на обрушающихся волнах) в формировании РЛ проявлений при различной геометрии наблюдения.
- Построить радиолокационные “образы” основных типов морских явлений и оценить их радиолокационную наблюдаемость при различных геометриях РЛ наблюдений, масштабах явлений и ветровых условиях.
- Применить разработанную модель для анализа данных подспутникового эксперимента “CoastWatch-95” и интерпретации имеющихся РЛ изображений, на которых зафиксированы проявления мезомасштабных океанических явлений.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в разработке усовершенствованной модели РЛ проявлений мезомасштабных динамических явлений, учитывающей в рамках единого подхода эффекты взаимодействия волн и течений, влияния приводного ветра, адаптированного под морскую поверхность, и воздействие плёнок ПАВ. Предлагаемый подход основывается на идее построения единой модели, описывающей как фоновые характеристики рассеяния морской поверхности, так и их изменения, вызванные неоднородностями морской среды.

Теоретическая и практическая значимость

Разработка усовершенствованной модели РЛ проявлений, способной на количественном уровне воспроизводить данные наблюдений (решение прямой задачи), позволяет в будущем перейти к решению обратной задачи — восстановлению характеристик мезомасштабных динамических процессов в океане, что явилось бы ценнейшим инструментом их изучения из космоса. Особое место занимает проблема РЛ идентификации морских фронтов. Фронтальные разделы, как правило, являются зонами повышенной биологической продуктивности. Разработка РЛ методов определения положения и характеристик океанических фронтов из космоса представляет исключительный интерес для рыбного промысла. Решение этой проблемы позволило бы резко сократить непроизводительные судовые расходы, связанные с поиском фронтальных зон — зон наиболее вероятного скопления рыб

в открытом океане. Уже один этот факт определяет прикладную значимость данного исследования.

Разработанная комплексная модель проявления мезомасштабной изменчивости океана на РЛИ может быть применена для нужд

- Рыбного промысла, для обнаружения и контроля положения фронтальных зон, зон конвергенции течений и связанных с ними ареалов обитания пелагических рыб.
- Оперативного выявления и мониторинга загрязнений поверхности моря нефтепродуктами.
- Подводного и надводного мореплавания — выявления зон представляющих потенциальную опасность (например, зоны интенсивного внутреннего и поверхностного волнения, границы сильных поверхностных течений).

Положения выносимые на защиту

- При малых углах зондирования определяющий вклад в формирование РЛ проявлений вносят зеркальные отражения радиоволн, а при умеренных и больших углах — рассеяние радиоволн от обрушений ветровых волн. Несмотря на то, что береговое рассеяние дает основной вклад в фоновое рассеяние, его роль в формировании РЛ контрастов течений незначима.
- Среднеквадратичный наклон морской поверхности (СКН) и доля поверхности моря, покрытой барашками, являются основными информативными параметрами. Среди всех возможных комбинаций компонент тензора сдвига вектора скорости течения, определяющее влияние на пространственные вариации этих параметров оказывает дивергенция вектора скорости поверхностного течения. Соответственно, РЛ проявления несут информацию о зонах конвергенции/дивергенции океанических течений.
- РЛ проявления зон конвергенции/дивергенции морских течений на ГГ поляризации выражены сильнее, чем на ВВ. Величина РЛ контраста пропорциональна дивергенции вектора поверхностного течения, и уменьшается с увеличением скорости ветра. Предложены параметризации РЛ контрастов, которые могут быть использованы в обратной РЛ задаче — восстановлении величины дивергенции вектора течения по РЛ сигналу.
- Температурные фронты, сопровождающие динамические явления, оказывают существенное влияние на формирование РЛ проявлений. Влияние осуществляется за счет пространственных вариаций поверхностных ветровых напряжений, возникающих за счет трансформации атмосферного погранслоя. Ветровые напряжения определяют спектр береговой ряби и существенно

вливают на другие РЛ информативные параметры — СКН поверхности и обрушения волн. Контраст РЛ изображений тем сильнее, чем меньше скорость ветра и больше перепад температуры через фронт.

- Построены образы РЛ проявлений различных типов мезомасштабных явлений, иллюстрирующие многообразие факторов ответственных за формирование РЛ проявлений (тип явления, его масштаб, присутствие ПАВ, ветровые условия, геометрия РЛ наблюдений).

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на международных симпозиумах “Атмосферная радиация” в 1999, 2000 и 2002 гг. (С.-Петербург), международных симпозиумах по наукам о Земле и дистанционному зондированию (IGARSS) в 1999 г. (Гамбург, Германия) и в 2001 г. (Сидней, Австралия), международном коллоквиуме EURISY в 2000 г. (Москва), всероссийской конференции “Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами” в 2001 г. (Муром), симпозиуме Европейского геофизического общества (EGS) в 2002 г. (Ницца, Франция). Разработанное в рамках данной работы программное обеспечение используется в Международном Центре по Окружающей Среде и Дистанционному Зондированию им. Нансена (С.-Петербург).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ.

Личный вклад автора

Автор работы принимал участие на всех этапах исследования от постановки задачи и разработки математических моделей до обсуждения и анализа результатов численного моделирования. Автор обеспечивал компьютерную обработку использованных спутниковых данных и разработку компьютерных программ, реализующих модели радиолокационного рассеяния и трансформации характеристик ветрового волнения.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии, включающей 97 наименования, из них 83 на иностранных языках. Общий объём работы — 170 машинописных страниц, включая 50 рисунков и 1 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, определены цели и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе строится “фоновая” радиофизическая модель морской поверхности, когда поле ветра постоянно и течения отсутствуют. Эта модель включает в себя модель РЛ рассеяния радиоволн и модель ветрового волнения. Предлагаемая модель является обобщением радиофизической модели [1] на случай малых

углов падения радиоволн ($\theta < 25^\circ$), когда роль зеркальных отражений радиоволн от морской поверхности становится значимой или определяющей. В этом диапазоне углов падения происходит РЛ съемка поверхности океана существующими космическими РЛ системами (ERS-2, RADARSAT, ENVISAT).

В §1.1 дается обзор существующих моделей спектров ветровых волн. Особое внимание уделяется тем спектрам, которые дают правильные оценки СКН поверхности моря. Именно эта характеристика играет важную роль в радиолокации. Предпочтение отдается моделям спектра, полученным как решение уравнения баланса энергии волн. Это необходимо для того, чтобы выбранная модель в дальнейшем могла быть использована для расчёта эволюции спектра в неоднородной среде. В качестве “базовой” модели спектра выбран спектр предложенный в работе [1].

В §1.2 строится модель РЛ рассеяния пригодная при произвольных углах зондирования — от надирных до настильных. Существующие модели обратного рассеяния являются предельными случаями “точного” решения задачи рассеяния (в этом случае они достаточно просты, но неприменимы для всех углов падения). Это — резонансная модель рассеяния, пригодная для средних и больших углов падения и модель зеркальных отражений радиоволн, применимая при малых углах. В силу их простоты, эти модели наиболее часто используются в различных приложениях.

Резонансная (брегговская) модель рассеяния основана на методе малых возмущений и применима, когда параметр $4k_z^2 h^2 \ll 1$ (h^2 — дисперсия возвышений, k_z — вертикальная проекция волнового вектора радиоволны). При зондировании в микроволновом диапазоне (k_z порядка сантиметров) этому условию удовлетворяют лишь очень короткие поверхностные волны из гравитационно-капиллярного диапазона. Поэтому, для реальной морской поверхности используется обобщенная двухмасштабная брегговская модель. В рамках этой модели влияние длинных волн заключается в модуляции локальных углов падения радиоволн. Выражение для УЭПР (удельной эффективной площади рассеяния) получается интегрированием по всем наклонам длинных волн.

В случае малых углов падения ($\theta < 20^\circ$) двухмасштабная модель даёт нереально большие значения УЭПР (см. кривую 1 на рис. 1). Это объясняется тем, что при малых θ появляются такие наклоны длинных волн, при которых брегговская теории неприменима. По нашим расчётам для реальных условий локальный угол падения должен быть больше 10° . Предложена модификация двухмасштабной модели, которая заключается в том, что при интегрировании по наклонам длинных волн, необходимо учитывать только те участки поверхности, для которых локальный угол падения $> 10^\circ$. Расчет по модифицированной брегговской модели показан кривой 2 на рис. 1. Эта простая модификация позволила естественным образом описать “переключение” между различными режимами рассеяния — от

резонансного рассеяния при умеренных углах падения к квазизеркальным отражениям при надирных.

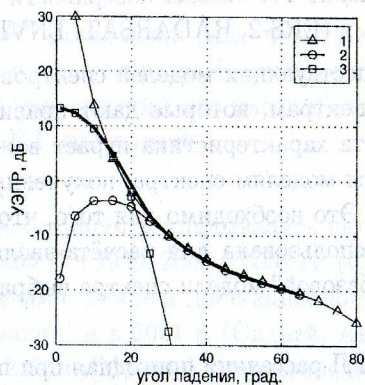


Рисунок 1 — УЭПР морской поверхности для скорости ветра 10 м/с и спектра волнения [1], рассчитанные по различным моделям рассеяния. Частота излучения 5,36 ГГц, ВВ поляризация, угол визирования 0°. 1 — “стандартная” двухмасштабная модель. 2 — двухмасштабная модель с учётом ограничения на локальный угол падения. 3 — квазизеркальные отражения. Жирная линия — сумма кривых 2 и 3.

Участки поверхности, для которых локальный угол падения радиоволн близок к надирному, обеспечивают зеркальные отражения (кривая 3 на рис. 1). Роль коротких волн в этом случае сводится к модификации коэффициента отражения Френеля: $R^2 = R_0^2(1 - 4k_z^2\zeta^2)$ (здесь R_0 — коэффициент отражения “зеркальной” поверхности).

Резонансное рассеяние и квазизеркальные отражения обеспечиваются пересекающимися участками поверхности. Поэтому общая УЭПР поверхности может быть получена простым сложением этих двух “частных” УЭПР: $\sigma_{br} + \sigma_{sp}$. На рис. 1 жирной кривой показана суммарная УЭПР. Несмотря на то, что этот результат был получен достаточно простыми модификациями двух известных асимптотических режимов рассеяния, он хорошо согласуется с результатами более строгих (но и более громоздких) методов решения задачи рассеяния радиоволн на неровной поверхности (см., например, [2]).

Описанная модель применима к “регулярной” морской поверхности, т.е. тем её участкам, где нет обрушений ветровых волн. Обрушения ветровых волн вносят существенный вклад в РЛ сигнал, что отмечалось во многих исследованиях. В данной работе вклад обрушений волн в РЛ сигнал учтён по модели, предложенной в [1]. В этой модели, что РЛ рассеяние происходит за счет квазизеркальных отражений от крутых элементов обрушающихся гребней волн. При этом вклад обрушений в УЭПР пропорционален доли поверхности моря, покрытой зонами обрушений гребней волн (далее — “барашками”).

Итак, в рамках предложенной радиофизической модели, морская поверхность делится на участки двух видов — зоны обрушений, доля которых составляет q , а УЭПР барашка σ_{wb} , и всю остальную, “регулярную” поверхность. Общая УЭПР, таким образом, имеет вид

$$\sigma^P = (1 - q)(\sigma_{br}^P + \sigma_{sp}) + q\sigma_{wb} \quad (1)$$

(индекс P указывает на поляризацию; квазизеркальные отражения и рассеяние на барашках поляризационно независимы).

В §1.3 фоновая модель УЭПР сравнивается с известными экспериментальными данными, в частности, с эмпирическими моделями NSCAT и CMOD4, данными самолётного радиоальтиметра и многочастотного двухполяризационного скаттерометра. Показано, что модель воспроизводит наблюдаемые абсолютные значения УЭПР и поляризационное отношение. В этом же разделе обсуждается вклад различных механизмов рассеяния в полную УЭПР в зависимости поляризации и длины волны.

На рис. 2а,б показан вклад обрушения волн (σ_{wb}/σ^P), зеркальных отражений (σ_{sp}/σ^P) и их суммы (т.е. вклад небрегговского рассеяния) в полную УЭПР Ку-диапазона при ВВ и ГГ поляризации, а на рис. 2в,г — в УЭПР С-диапазона. Эти величины показаны как функция угла падения при скорости ветра 10 м/с. Как следует из этих расчетов, вклад небрегговского рассеяния более значим на ГГ поляризации, чем на ВВ. Это связано с тем, что σ_{wb} и σ_{sp} поляризационно независимы, а $\sigma_{br}^V > \sigma_{br}^H$. Квазизеркальные отражения доминируют в небрегговском рассеянии при $\theta < 20^\circ$, при больших углах доминирующую роль играют обрушения волн. На ГГ поляризации при больших углах падения обрушения волн дают основной вклад в УЭПР. Вклад небрегговского рассеяния в УЭПР морской поверхности С-диапазона подобен Ку-диапазону, однако его относительный вклад несколько меньше.

Результаты расчетов, приведенные на рис. 2, могут использоваться для оценки роли вариации различных параметров в формировании проявления мезомасштабной изменчивости в РЛ изображениях. При малых углах падения, на ВВ и ГГ поляризации определяющую роль играют вариации СКН поверхности; при умеренных углах падения и ВВ поляризации — спектр брегговской ряби; на ГГ поляризации (и ВВ поляризации при больших углах падения) — вариации обрушения ветровых волн. При больших углах падения и ГГ поляризации роль обрушения волн в формировании РЛ проявлений является доминирующей.

Вторая глава. Построенная модель УЭПР описывает обратное рассеяние при заданных статистических характеристиках морской поверхности. Для моделирования РЛ проявлений мезомасштабных океанических явлений необходимо решить задачу о трансформации спектра ветровых волн в неоднородной среде, которая, применительно к нашей проблеме, формируется поверхностными течениями,

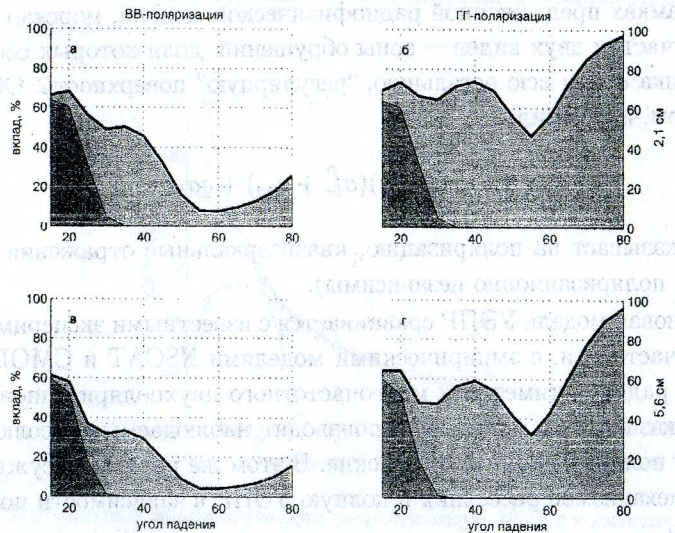


Рисунок 2 — Вклад небрежговского рассеяния в полную УЭПР морской поверхности для C- и Ku- диапазонов, ВВ и ГГ поляризаций. Тёмно-серый цвет относится ко вкладу квазизеркальных отражений, светло-серый цвет — ко вкладу обрушений волн.

неоднородностями поверхностной температуры и плёнками ПАВ. Конкретный вид поля неоднородностей определяется типом мезомасштабного явления.

В §2.1 приводятся основные уравнения динамики и кинематики волновых пакетов в неоднородной среде. Для простоты уравнение эволюции спектра волнового действия N рассматривается в релаксационном приближении

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N - N_0}{\tau_r} \quad (2)$$

где $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + c_{gj} \frac{\partial}{\partial x_j} - k_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial k_i}$ (c_g — групповая скорость, \mathbf{u} — скорость поверхностных течений), N_0 — фоновый спектр поверхности, определяемый локальными свойствами среды, τ_r — время релаксации, являющееся основным параметром модели. τ_r не может быть задано произвольно, а должно быть согласовано с формой источника энергии, который в однородной среде определяет фоновый спектр. Показано, что это согласование может быть достигнуто, если время релаксации определяется следующим образом

$$\sigma \tau_r = \frac{m_*}{u_* \partial \beta / \partial u_*} \quad (3)$$

где σ — частота волны, u_* — динамическая скорость ветра, β — безразмерный коэффициент ветроволнового взаимодействия, $m_* = \partial(\ln N_0) / \partial(\ln u_*)$ — показатель ветровой зависимости спектра. Такое определение времени релаксации не требует

знания всех компонент энергетического баланса спектра (к которым относятся приток энергии от ветра, потери энергии за счёт обрушений и вязкой диссипации, нелинейные взаимодействия), а определяется при известном выражении для β только лишь через ветровую зависимость спектра, которая может быть задана как модельно, так и эмпирически, по данным измерений.

Уравнение (2) совместно с кинематическими законами сохранения волновых пакетов полностью описывает эволюцию волн в неоднородной среде. При этом, соотношение времени релаксации τ_r и времени взаимодействия волны с неоднородностями среды L/c_g (где L — масштаб неоднородности среды) полностью определяет режим эволюции. При $\tau_r \ll L/c_g$ спектр волн в произвольной точке пространства соответствует равновесному спектру N_0 , определяемому локальной скоростью ветра и плёнками ПАВ (эффект плёнок ПАВ учитывается через коэффициент вязкости). При $\tau_r \gg L/c_g$, трансформация спектра, в основном, определяется взаимодействием волн с течением. В этом случае правая часть (2) равна нулю, и спектр сохраняется вдоль траектории волнового пакета.

Хотя численное решение уравнений эволюции спектра не представляет затруднений, привлекательным представляется получение на их основе простых аналитических оценок эффектов. В §2.2 такие оценки были получены путём линеаризации решения уравнения баланса волнового действия, выписанного в квадратурах. Анализируются два асимптотических режима трансформации спектра.

В первом случае (режим “быстрой релаксации”), когда масштаб неоднородности среды велик по сравнению с масштабом релаксации волн, т.е. $L > l_r$ получено следующее решение

$$N(\mathbf{k}, t) = N_0(\mathbf{k}, t) \left(1 + m_k^{ij} \frac{l_r}{c_g} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - m_* \kappa_i \frac{l_r}{u_*} \frac{\partial u_*}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

где m_k^{ij} — тензор нормированного градиента спектра по волновым числам, $\kappa = \mathbf{k}/k$ — единичный волновой вектор. Как следует из (4), спектр волн в данной точке пространства (задаваемой временем t) определяется локальными свойствами среды — скоростью ветра, эффективной вязкостью воды (определяющих форму равновесного спектра $N_0(\mathbf{k})$), и локальными градиентами течений и скорости ветра. Если $l_r \ll L$, то вклад пространственных градиентов среды пренебрежимо мал, а спектр волн соответствует локальному равновесному спектру.

Во втором случае (случай “быстрых волн”) малым параметром, по которому можно провести линеаризацию, оказывается отношение скорости течения к групповой скорости и решение имеет вид

$$N(\mathbf{k}, t) = N_0(\mathbf{k}, t) \left(1 + m_k^{ij} \frac{l_r}{c_g} \bar{u}_{ij} - m_* \frac{\Delta u_*}{u_*} \right) \quad (5)$$

где \bar{u}_{ij} — градиент скорости течения, осредненный вдоль волновой траектории на

масштабе l_r и определенный как

$$\bar{u}_{ij} = - \int_0^t e^{-(t-t_1)/\tau_r} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} d \frac{t-t_1}{\tau_r} \quad (6)$$

Δu_* — аналогичным образом осреднённое отклонение динамической скорости зетра от его значения в данной точке пространства.

При достаточно плавно меняющихся течениях область применимости асимптотического решения (5) смещается в коротковолновую область. При этом, если градиенты течения и ветра на масштабах l_r (относящихся к наиболее коротким ‘быстрым’ волнам) меняются мало, то уравнение (5) переходит в асимптотику (4). Таким образом, мы можем предположить, что на мезомасштабных течениях решение (5) является одинаково пригодным для всех спектральных компонент.

Приведённые выше решения использованы для оценки контрастов РЛ информативных параметров — среднеквадратичного наклона s^2 и доли поверхности моря, покрытой барашками q

$$\Delta s^2 / s_0^2 = \iint_{k < k_t} T(\mathbf{k}) B(\mathbf{k}) d\varphi d \ln k / \iint_{k < k_t} B(\mathbf{k}) d\varphi d \ln k \quad (7)$$

$$\Delta q / q_0 = (n_g + 1) \iint_{k < k_t} T(\mathbf{k}) \beta B(\mathbf{k}) d\varphi d \ln k / \iint_{k < k_t} \beta B(\mathbf{k}) d\varphi d \ln k \quad (8)$$

где передаточная функция

$$T(\mathbf{k}) = \tau_r m_k (\overline{\text{div } \mathbf{v}} \cos^2 \varphi - \bar{v}_{22} \cos 2\varphi) - m_* \Delta u_* / u_* \quad (9)$$

определяет вклад различных спектральных интервалов в вариации интегральных статистических характеристик поверхности.

Важнейшим выводом, следующим из этих рассмотрений, является то, что из всей совокупности набора компонент тензора градиента скорости течения, определяющее значение в формирование поверхностных проявлений вносит дивергенция вектора течений. Отметим также, что доля поверхности моря покрытой барашками является весьма чувствительным индикатором течений — как следует из (8), вариации спектра в равновесном интервале с $(n_g + 1) = 6$ -тикратным усилением отображаются в вариациях q .

Если предположить, что влияние течений приводит к малым отклонениям s^2 и q , то линеаризованное выражение для УЭПР примет вид

$$\frac{\sigma^P}{\sigma_0^P} = 1 + p_{br}^P \frac{g P s_0^2}{1 + g P s_0^2} \frac{\Delta s^2}{s_0^2} + p_{sp}^P \left(\frac{\text{tg}^2 \theta}{s_0^2} - 1 \right) \frac{\Delta s^2}{s_0^2} + p_{wb}^P \frac{\Delta q}{q_0} \quad (10)$$

где σ_0^P — УЭПР морской поверхности, определяемая локальными ветром и характеристиками ПАВ, p_{br}^P , p_{sp}^P и p_{wb}^P — соответственно отношение резонансного,

квазизеркального рассеяния и рассеяния на гребнях обрушающихся волн к полной УЭПР. Эти характеристики приведены на рис. 2.

В §2.3 модель трансформации ветровых волн дополнена ‘атмосферным’ блоком, учитывающем эволюцию атмосферного пограничного слоя над неоднородностями температуры поверхности океана. При горизонтально однородных параметрах свободной атмосферы (её температура и геострофический ветер) влияние пространственных неоднородностей поверхностной температуры T_s на характеристики ветрового волнения осуществляется через приводный ветер (или поверхностные ветровые напряжения). Изменения поверхностной температуры приводят к вариациям стратификации планетарного атмосферного погранслоя, с которыми и связаны коррелированные с полем T_s пространственные вариации приводного ветра. При набегании воздушного потока на теплый/холодный фронт T_s происходит увеличение/уменьшение скорости приводного ветра. Типичные для реальных условий перепады T_s вызывают существенные изменения характеристик ветрового волнения, причём этот эффект тем больше, чем меньше скорость приводного ветра.

В рамках предложенной модели, влияние плёнок ПАВ (скапливающиеся в зонах конвергенции течений) на ветровые волны учтено за счет введения эффективного коэффициента вязкости воды, являющегося функцией упругости плёнок ПАВ. Увеличение коэффициента вязкости приводит к подавлению коротковолнового интервала спектра, к которому относится брегговская рябь. Показано, что при малых ветрах этот эффект приводит к полному подавлению брегговской ряби.

В третьей главе на основе построенной комплексной модели проявления мезомасштабной изменчивости океана на РЛ изображениях на модельных примерах проанализирована наблюдаемость океанических особенностей в зависимости от геометрии РЛ наблюдений, ветровых условий и характеристик самой особенности. Рассмотренные мезомасштабные явления включали: зоны конвергенции и дивергенции течений (§3.2), сдвиговое течение (§3.3), фронтальный раздел в поле температуры (§3.4), фронтальные вихри (§3.5). Выбор именно таких типов явлений обоснован в §3.1 в контексте приложения к проблемам промысловой океанологии.

Данные модельных расчетов показывают, что в зонах конвергенции/дивергенции течений происходит, соответственно, увеличение/уменьшение обрушений волн и СКН поверхности. Влияние сдвигового течения (при той же величине градиента скорости) на обрушения волн и СКН поверхности намного слабее, чем конвергентно-дивергентного течения. Однако, учёт меандрирования границы сдвигового течения приводит к существенному усилению контрастов обрушения волн и СКН поверхности на границе течений. Это связано с тем, что нестационарность границы сдвигового течения ‘генерирует’ поперечную линии сдвига компоненту скорости течения, с которой связана конвергентно-дивергентная область на границе сдвига течения. По-видимому, этот эффект и порождает на границе сдвигового тече-

ния чередующуюся линейную структуру усиленной-ослабленной шероховатости поверхности, часто наблюдаемую в натуральных условиях.

Особый интерес представляет анализ проявления вихревых образований. В качестве “входных” данных нами использовались поля поверхностных течений и температуры, полученных в результате численного моделирования [3]. Поле скорости течения и соответствующее ему поле дивергенции представлены на рис. а,б. По данным расчетов, пространственная структура поверхностных контрастов СКН морской поверхности и обрушения волн в зоне существования вихря в целом отражает поле дивергенции поверхностного течения вихря. Влияние завихренности поля течения — незначительно. На рис. в показано поле РЛ контрастов (ВВ поляризация, угол падения 23° , длина волны 5,6 см) формируемое полем течения. Видно, что поле РЛ контрастов во многом повторяет поле дивергенции течения. Учёт поля температуры во фронтальном вихре, приводит к существенной модификации вида РЛ контрастов (рис. г). На холодной стороне фронта, за счет формирования устойчивой стратификации, ветровые напряжения и соответственно уровень спектра береговых волн существенно меньше, чем на теплой стороне. Этот эффект приводит к “биполярной” структуре РЛ проявления, характеризующейся интенсивным РЛ рассеянием в теплом секторе фронта и ослабленным — в холодном.

В §3.6 проанализирована зависимость РЛ контрастов перечисленных явлений от поляризации, длины волны и угла падения излучения, а также от пространственного масштаба неоднородности течения и скорости приводного ветра. Показано, что РЛ контрасты, при прочих фиксированных условиях, выше на ГГ поляризации, чем на ВВ, а также растут при уменьшении длины радиоволны, уменьшении масштаба течения и уменьшении скорости ветра.

В четвертой главе построенная модель РЛ проявления мезомасштабной изменчивости океана применяется для интерпретации реальных РЛ изображений, полученных в районе Норвежского Берегового течения во время эксперимента “CoastWatch-95”, включавших, в частности, квазисинхронные контактные и спутниковые РЛ наблюдения одного и того же фронта дважды — с разницей во времени 11 часов. Описание данных эксперимента дано в §4.1.

В §4.2 продемонстрирована способность модели объяснять наблюдаемые РЛ проявления океанического фронта. В первом (“утреннем”) случае основными наблюдаемыми особенностями РЛ образа фронта были ступенчатообразный перепад УЭПР между тёплой и холодной сторонами фронта и подчёркивание линии фронта локальным увеличением УЭПР. Во втором (“вечернем”) случае обе эти особенности были выражены слабо. Согласно модели, разница в величине перепадов УЭПР через фронт для этих двух случаев была обусловлена разницей в режимах трансформации приводного слоя атмосферы над неоднородностями ТПО. В утреннем случае стратификация АПС сменилась с неустойчивой на устойчи-

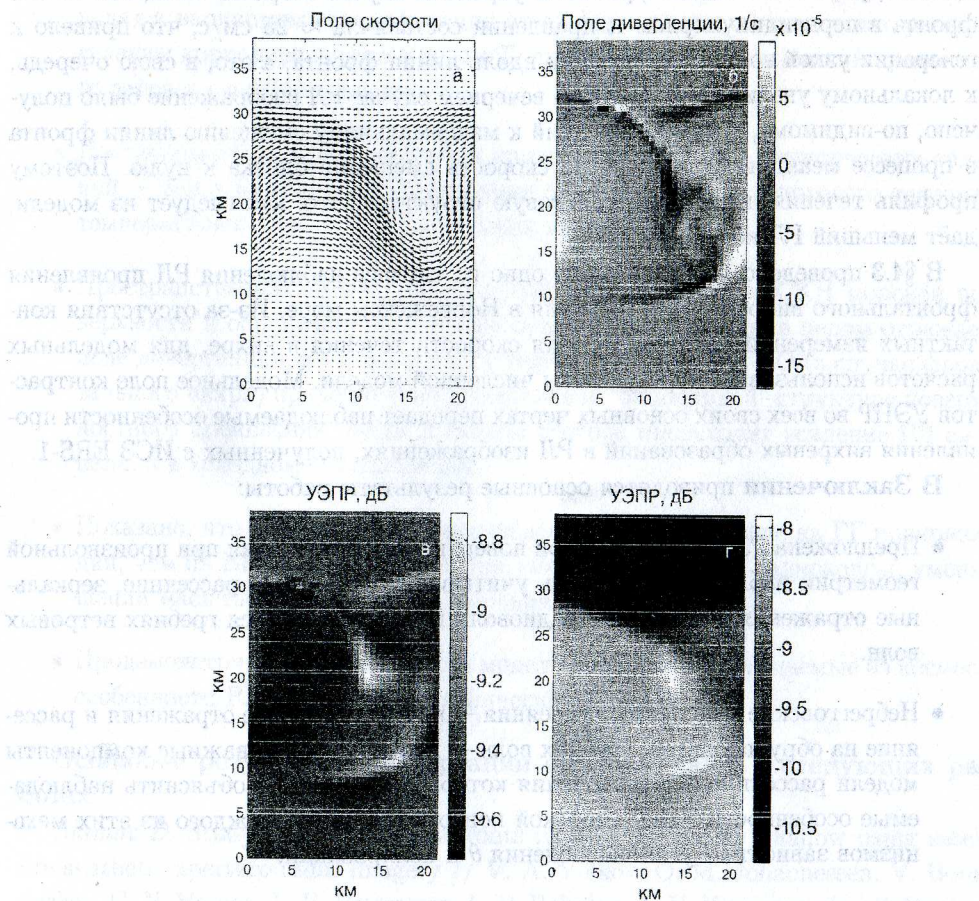


Рисунок 3 — Модельные расчёты РЛ образа фронтального вихря. а — поле поверхностных течений. Максимальная скорость 60 см/с. б — поле дивергенции скорости. Внизу слева — поле дивергенции скорости течения. в — поле УЭПР (С-диапазон, ВВ поляризация, $\theta = 23^\circ$. г — то же, дополнительно учтены эффекты неоднородности ТПО. Скорость ветра на стандартном горизонте 5 м/с, его направление — 45° к оси x . Температура свободной атмосферы $+9,7^\circ\text{C}$.

вую, что привело к значительному изменению динамической скорости ветра и, как следствие, УЭПР. В вечернем случае изменения знака стратификации не произошло, поэтому выраженный перепад УЭПР не сформировался.

Разницу в проявлении самой линии фронта можно объяснить разными фазами меандрирования линии фронта. В утреннем случае скорость смещения линии фронта в перпендикулярном направлении составляла ≈ 25 см/с, что привело к генерации узкой зоны конвергенции вдоль линии фронта, а это, в свою очередь, к локальному увеличению УЭПР. В вечернем случае РЛ изображение было получено, по-видимому, в момент близкий к максимальному смещению линии фронта в процессе меандрирования, когда скорость смещения близка к нулю. Поэтому профиль течения имел чисто сдвиговую структуру, что, как следует из модели, даёт меньший РЛ контраст.

В §4.3 проведено моделирование одно из случаев наблюдения РЛ проявления фронтального вихревого образования в Норвежском море. Из-за отсутствия контактных измерений двумерного поля скорости течения в вихре, для модельных расчетов использовались результаты численной модели. Модельное поле контрастов УЭПР во всех своих основных чертах передает наблюдаемые особенности проявления вихревых образований в РЛ изображениях, полученных с ИСЗ ERS-1.

В Заключении приводятся основные результаты работы:

- Предложена РЛ модель морской поверхности работающая при произвольной геометрии наблюдений. Модель учитывает резонансное рассеяние, зеркальные отражения и рассеяние радиоволн на обрушающихся гребнях ветровых волн.
- Небрегговские механизмы рассеяния — квазизеркальные отражения и рассеяние на обрушающихся гребнях волн — принципиально важные компоненты модели рассеяние, без включения которых невозможно объяснить наблюдаемые особенности УЭПР морской поверхности. Роль каждого из этих механизмов зависит от угла наблюдения θ и поляризации.
- Задача о трансформации поверхностного волнения решена в релаксационном приближении, где время релаксации задается не произвольным образом, а согласовано с источниками/стоками энергии волн. На масштабах неоднородностей среды (100 м и более) брегговская рябь “не чувствует” течений, а её спектр определяется только лишь динамической скоростью и пленками ПАВ. В то же время, СКН поверхности и обрушения волн трансформируются как под действием приводного ветра так и неоднородных течений.
- Получено аналитическое решение задачи, описывающее трансформацию СКН поверхности и обрушений волн на течениях. Показано, что среди всех компонент тензора градиента скорости поверхностного течения комбинация $\partial u_x / \partial x +$

$\partial u_y / \partial y$, т.е. его дивергенция, оказывает определяющее влияние на проявление течений.

- Влияние пространственных неоднородностей ТПО на характеристики ветрового волнения осуществляется через приводный ветер. Изменения ТПО приводят к вариациям стратификации атмосферного погранслоя, с которыми и связаны коррелированные с полем T_s пространственные вариации приводного ветра и спектра волнения.
- Построены образы поверхностных проявлений типичных океанических явлений — зон конвергенции/дивергенции течений, границ сдвигового течения, температурного фронта, фронтальных вихрей.
- Пространственная структура поверхностных контрастов СКН морской поверхности и обрушения волн в зоне существования вихря в целом отражает поле дивергенции поверхностного течения вихря. Учёт ТПО (в случае фронтального вихря) приводит к дополнительной “биполярной” структуре поверхностного проявления, когда в теплом секторе происходит усиление РЛ сигнала, а в холодном — ослабление.
- Показано, что РЛ контрасты перечисленных явлений выше на ГГ поляризации, чем на ВВ, а также растут при уменьшении длины радиоволны, уменьшении масштаба течения и уменьшении скорости ветра.
- Продемонстрирована способность модели объяснять наблюдаемые из космоса особенности РЛ проявления океанических явлений.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

Akimov D. Study of river outflow fronts in the Ob-Yenisey Shallow using satellite synthetic aperture radar imagery // V. A. Volkov, O. M. Johannessen, V. Borodachev, G. N. Voinov, L. H. Pettersson, L. P. Bobylev, A. V. Kouraev, eds., *Polar Seas Oceanography. An integrated case study of the Kara Sea.* — Springer-Praxis, 2002. — Pp. 87–99.

Johannessen O. M., Espedal H. A., Furevik B., Akimov D. B., Jenkins A. Coastwatch: Integrating satellite imagery in an operational system for monitoring coastal currents, wind, surfactants and oil spills // S. Vallerga, N. Flemming, eds., *Operational Oceanography — Extending the limits of predictability.* — Elsevier, 2001. — Pp. 455–465.

Кудрявцев В. Н., Акимов Д. Б., Йоханнессен О. Проявление мезомасштабной изменчивости моря на радиолокационных изображениях его поверхности // *Исслед. Земли из космоса.* — 2003. — № 2. — в печати.

Акимов Д. Б., Йоханнесен О. М., Кудрявцев В. Н. Валидация модели радиолокационного изображения поверхности океана с использованием данных эксперимента "CoastWatch-95" и спутниковых РСА изображений // Сборник трудов Всероссийской конференции "Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами". — г. Муром: 2001. — С. 504–509.

Akimov D. B., Johannessen O. M., Mitnik L. M., Volkov V. A. Signatures of fronts in the Ob and Yenisey estuaries in the Kara Sea // Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium. — Hamburg, Germany: 1999. — Pp. 2542–2544.

Johannessen O. M., Espedal H., Akimov D. B. CoastWatch-95: modelling of ocean fronts imaged by SAR // Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium. — Hamburg, Germany: 1999. — Pp. 1957–1959.

Akimov D. B., Johannessen O. M., Kudryavtsev V. N. On the radar imaging of the sea frontal zone: CoastWatch-95 experiment and its analysis // Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium. — Sydney, Australia: 2001. — on CD-ROM.

Akimov D. B., Johannessen O. M., Mitnik L. M., Shuchman R. A. Validation of the ERIM model for ocean surface radar imaging using ERS SAR data and in situ measurements near current fronts // Abstracts of International Radiation Symposium. — St. Petersburg: 2000. — P. 214.

Акимов Д. Б., Кудрявцев В. Н., Йоханнесен О. М., Элдевик Т. О. проявлении мезомасштабных океанских явлений на радиолокационных изображениях поверхности океана // Тезисы докладов Международного симпозиума стран СНГ "Атмосферная радиция". — г. С.-Петербург: 2002. — С. 93.

Литература других авторов, использованная в автореферате

[1] Kudryavtsev V., Hauser D., Caudal G., Chapron B. A semi-empirical model of the normalized radar cross-section of the sea surface. Part 1: The background model // J. Geophys. Res. — 2003. — Vol. 108, no. C3 — in press.

[2] Voronovich A. G., Zavoronty V. U. Theoretical model for scattering of radar signals in ku- and c-bands from a rough sea surface with breaking waves // Waves in Random Media. — 2001. — Vol. 11. — Pp. 247–269.

[3] Eldevik T., Dysthe K. B. Spiral eddies // J. Phys. Oceanogr. — 2002. — Vol. 32. — Pp. 851–869.



БОРИСОВИЧ

РАТ

л-макета 11.02.03.

я. Печать графаретная.

00 экз. Заказ № 50. С 2а.

лесотехническая академия

й отдел СПбЛТА

ститутский пер., 3