

На правах рукописи

МАЛИНОВСКИЙ Владимир Васильевич

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТОБРАЖЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ПОВЕРХНОСТНЫХ И ВНУТРЕННИХ ВОЛН В РАДИОЛОКАЦИОННОМ
СИГНАЛЕ* ПРИ МАЛЫХ УГЛАХ СКОЛЬЖЕНИЯ

04.00.22 - геофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук

Севастополь - 1992



Робота виконана в Морському гідрофізическому інституті АН України.

Научний керівник: доктор фізико-математических наук В.Н.Кудрявцев

Офіціальні опоненти:

доктор фізико-математических наук Н.А.Пантелєєв
кандидат фізико-математических наук А.А.Калінкевич

Ведущая організація: Центральний науко - дослідницький інститут "Комета" (г.Москва).

Захита состоится "26" ноября 1992 г. в 9⁰⁰ часов на засіданні спеціалізованого совета Д 016.01.01 при Морському гідрофізическому інституті АН України

Адрес інститута: 335000, г.Севастополь, ул.Капитанская, 2

С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале библиотеки МТИ АН України.

Автореферат разослан "15" сентября 1992 г.

Ученый секретарь
спеціалізованого совета
кандидат фізико-математических наук

А.М.Суворов

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Радиолокационное (РЛ) зондирование является одним из основных методов дистанционного исследования океана. По РЛ данным определяются, например, параметры ветрового волнения, скорость ветра, идентифицируются различные динамические явления. За последнее десятилетие наиболее обширный экспериментальный материал в этом направлении получен при изучении внутренних волн (ВВ) по их проявлениям на поверхности океана. Свидетельством этому служат эксперименты, проведенные с борта судна (Веселов и др. 1984), данные по индикации ВВ из космоса с борта SEASAT (Apel, Gonzalez, 1983; Track 1983; Huges, Gower, 1988), а также результаты, полученные в ходе экспериментов JOWIP (Hughes, Dawson, 1988), SARSEX (Gasparovic, Apel, 1988). Результаты этих наблюдений показывают, что РЛ средства СВЧ-диапазона можно, в принципе, использовать в качестве дистанционного волнографа ВВ, изучать с их помощью вопросы, относящиеся к задачам генерации и распространения внутренних волн.

Важным направлением РЛ исследований стали эксперименты по изучению модуляционных характеристик РЛ сигналов, позволяющие устанавливать связь между спектрами радиосигналов и спектрами поверхностных волн (Keller, Wright, 1975; Wright, Plant, 1980; Розенберг, 1990).

Большинство работ радиоокеанографической направленности посвящено результатам экспериментов, проводимых при больших углах облучения поверхности ($>20^\circ$). С одной стороны, это объясняется широким применением аэрокосмических систем, с другой стороны - возможностью использования хорошо разработанной теории резонансного рассеяния радиоволн морской поверхностью для интерпретации дистанционных данных.

Меньшее число работ посвящено результатам, полученным при малых углах скольжения, когда структура РЛ сигнала характеризуется особенностями, необъяснимыми в рамках модели "рябь на крупной волне" (Калмыков, Пустовойтенко, 1974, 1976). Для этих условий наблюдений в СВЧ-диапазоне эффективная площадь рассеяния морской поверхности определяется не только рассея-

АНБ им. В. Стефанкина
АН УРСР

нием на резонансной ряби, но и, в основном, процессами, связанными с обрушениями ветровых волн. Поскольку именно параметры обрушений являются сильно варьируемыми величинами при изменении гидрометеорологических условий (Дулов, Кудрявцев, 1986, 1988), проведение РЛ измерений при малых углах скольжения перспективно для диагноза состояния океана. Вследствии этого, необходимым становится изучение и описание связи характеристик РЛ сигнала с параметрами обрушений ветровых волн.

Все вышеперечисленное, в основном, и определяет актуальность и направленность проведенных исследований по отображению поверхностных и внутренних волн в РЛ сигнале.

Цель и задачи работы. Цель работы состоит в экспериментальном исследовании особенностей формирования РЛ сигнала, рассеянного морской поверхностью при малых углах скольжения.

Создание методов РЛ диагноза состояния поверхности океана предполагает выбор в качестве информативного параметра тех характеристик волнения, которые определяют основной вклад в рассеяние радиосигнала. Суммарная интенсивность РЛ сигнала формируется за счет многих факторов: уровня энергетического спектра резонансно-рассеивающей ряби, отражений от различных элементов обрушивающихся волн. Однако, обрушения ветровых волн рассматриваются в настоящее время как параметр, имеющий наибольшую информативность. Это связано, во-первых, с их существенным вкладом в суммарную мощность рассеяния и, во-вторых, именно характеристики обрушений (частота появления на единице площади, доля поверхности, покрытая пеной и др.) являются сильно варьируемыми параметрами при изменении метеоусловий и взаимодействии ветровых волн с течениями различного происхождения (Дулов, Кудрявцев, 1989).

Основная задача работы состоит в исследовании связи характеристик радиолокационного сигнала с параметрами морского волнения при малых углах скольжения и изучении проявлений в РЛ сигнале ВВ, сопровождающихся интенсификацией обрушений ветровых волн.

В диссертационной работе решаются следующие задачи:
- исследование связи спектральных и средних характе-

ристик РЛ сигнала с параметрами ветрового волнения при различных метеоусловиях;

- исследование статистических характеристик всплесков радиосигнала;

- оценка связи характеристик РЛ сигнала с параметрами обрушений ветровых волн;

- исследование отображения внутренних волн сезонного термоклина в параметрах РЛ сигнала;

- оценка возможности использования эффекта отображения ВВ в радиолокационном сигнале для создания модели восстановления параметров ВВ по дистанционной информации.

Цель работы и решаемые задачи находятся в рамках плановой тематики МГИ АН Украины по проектам "Космос" (шифр 0.74.02.02 Н № гос.рег. 01.86.0096758) и "Волна" (шифр 03.04 № гос.рег. 01.87.00180920).

Основные результаты работы и их новизна. В работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований особенностей формирования РЛ сигнала в 3-сантиметровом диапазоне радиоволн морской поверхностью при малых углах скольжения. Основные результаты работы могут быть сформулированы следующим образом.

1. Проанализированы данные экспериментальных исследований модуляционных передаточных функций "РЛ сигнал-морская поверхность" для горизонтальной (ГП) и вертикальной (ВП) поляризацій излучения. Показано, что влияние длинных волн на спектр флуктуаций радиосигнала при ВП больше, чем при ГП. В окрестности спектрального пика f_m при ВП сосредоточено ~25% энергии, а при ГП - ~14%. Указанное отличие сохраняется и в модуляционных спектрах РЛ сигнала. Наблюдается азимутальная изотропия модуляционных спектров. Модифицированная модуляционная передаточная функция "морская поверхность-рассеянный сигнал" M для ГП в среднем в 1,5 раза выше, чем для ВП в диапазоне частот $f > f_m$. Эмпирическая частотная зависимость величины M имеет вид: $M \sim f^{-1.5}$. Показано, что оценка коэффициента вариации обладает высокой устойчивостью для обеих поляризацій при различных условиях наблюдений.

2. Исследованы статистические характеристики всплесков РЛ сигнала при ГП излучения. Отмечается, что распределение амплитуд всплесков I правее его максимума можно описывать экспоненциальным законом. Наклон распределения α зависит от условий наблюдений: возрастает с уменьшением скорости ветра и увеличением угла облучения относительно генерального направления распространения ветровых волн. Показано, что распределение амплитуд всплесков, нормированных на их средние значения за цикл измерений, носит универсальный характер при различных гидрометеорологических условиях.

3. Предложена феноменологическая модель связи характеристик РЛ сигнала с параметрами обрушений ветровых волн. Выдвинута гипотеза о зависимости амплитуды всплеска от проекции τ длины обрушения на направление, перпендикулярное направлению облучения. В предположении пороговой модели обрушений получен вид распределения величины τ , которое определяется моментами спектра ускорений свободной поверхности. Показано, что связь параметра α_c распределений $\rho(\tau)$, рассчитанных по предлагаемой модели, входными данными которой являлись спектры ускорений поверхности, полученные при натурных измерениях, с наклонами α_R распределений $\rho(I)$ близка к линейной. Совпадение видов $\rho(I)$ и $\rho(\tau)$, а также полученная зависимость α_R от α_c подтверждает гипотезу о связи величин I и τ .

4. Показано, что в рамках предлагаемой модели объясняется азимутальный характер изменения среднего уровня РЛ сигнала и его зависимость от скорости ветра. Модельные расчеты согласуются с результатами экспериментов.

5. Проведены экспериментальные исследования отображения параметров внутренних волн в РЛ сигнале. Показано, что спектры радиосигнала и ВВ подобны и обладают одинаковым спектральным составом колебаний. Зона интенсивного рассеяния РЛ сигнала находится над задним склоном смещений термоклина и сдвинута на $\sim 1,25$ рад. от ложбины термоклина вперед по направлению распространения ВВ, т.е. расположена в области конвергенции горизонтальной компоненты орбитальной скорости ВВ.

6. Исследована эмпирическая зависимость амплитудной характеристики передаточной функции P "ВВ - РЛ сигнал". Показано, что величина P определяется скоростью ветра W , периодом $T_{ВВ}$ и параметром нелинейности $\epsilon_{ВВ}$ и увеличивается с ростом ее фазовой скорости. Эффективность отображения ВВ в РЛ сигнале снижается с ростом W . Установлена тенденция роста контраста РЛ сигнала K с увеличением $\epsilon_{ВВ}$: $K \sim 7 \cdot \epsilon_{ВВ}$.

7. Предложена модель проявления ВВ в РЛ сигнале. Модель связывает контраст сигнала с параметрами ВВ и ветрового волнения. Результаты расчетов по модели согласуются с экспериментальными данными.

Обоснованность научных положений и выводов. Эксперименты проведены с использованием специально разработанных методов исследований, прошедших предварительное тестирование. Все результаты теоретического анализа сопоставляются с данными специализированных экспериментов. Их количественное соответствие доказывает справедливость заложенных в модели физических концепций, обосновывает достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации.

Практическая ценность и прикладное значение. Результаты диссертации применимы, в первую очередь, к созданию методик обработки РЛ изображений океана, полученных с помощью береговых, судовых, или самолетных РЛ систем при скользких углах облучения. Предлагаемые результаты работы позволяют получать оценки спектральных характеристик ветрового волнения и параметров ВВ по их проявлениям на поверхности океана.

Основные результаты диссертации внедрены в хозяйственной тематике.

Публикации результатов диссертации и личный вклад автора. В работе изложены результаты исследований, выполненных в 1983 - 1991 гг. в МГУ АН Украины при личном участии автора. Основные результаты диссертации изложены в 10 научных статьях, из которых 6 опубликованы в центральной печати, включая "Известия АН СССР", серия "Физика атмосферы и океана", "Морской гидрофизический журнал".

Автору принадлежит научная постановка задачи, проведение экспериментов и анализ результатов по исследованию статистических характеристик РЛ сигналов и их связи с параметрами морской поверхности; обработка и анализ экспериментальных данных по отображению внутренних волн в РЛ сигнале, феноменологическая модель связи РЛ контрастов с параметрами внутренних волн; участие в обработке и анализе модуляционных характеристик радиолокационных сигналов, а также участие в проведении экспериментальных исследований совместно с сотрудниками МГИ АН Украины.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на III Съезде советских океанологов (Ленинград, 1987); 5-м Всесоюзном семинаре "Неконтактные методы и средства измерений океанографических параметров" (Москва, 1983); Всесоюзной конференции "Статистические методы обработки данных дистанционного зондирования окружающей среды" (Рига, 1986); на семинарах Морского гидрофизического института АН Украины, Института прикладной механики АН СССР, Института прикладной физики АН СССР, Центрального научно-исследовательского института "Комета".

П. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 125 страниц. Из них 84 страницы машинописного текста, 39 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 49 названий.

Во введении обсуждается актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи исследований, положения, выносимые на защиту, приведено краткое содержание работы, отмечен личный вклад автора.

Глава 1. Аппаратура и методика измерений.

В § 1.1 приводится описание радиолокационного комплекса для исследования особенностей формирования сигнала при малых углах скольжения. Основой комплекса являлась РЛ станция 3-сантиметрового диапазона "DECCA 110", у которой штатная антенна была заменена на параболическую с облучателем, позволя-

ющим изменять поляризацию излучения. Ширина диаграммы направленности антенны составляла на уровне половинной мощности $1,5^\circ$ в азимутальной и 8° в вертикальной плоскостях. Измерения выполнены в диапазоне углов скольжения от 5° до 1° при длительности зондирующего импульса 0,08 мкс.

Для измерения волнения во время опытов использовался свободно плавающий акселерометрический буй (масса ~ 8 кг, собственная частота колебаний 1 Гц).

В § 1.2 описывается аппаратура и методика проведения эксперимента по изучению ВВ. Основной комплекс измерений для проведения исследований проявления ВВ в РЛ сигнале осуществлялся с дрейфующего судна и включал регистрацию следующих физических параметров: уровня обратного рассеяния радиоволн (длина волны излучения 3,2 см), смещения термоклина внутренней волной, модуля и направления скорости ветра, направления и скорости дрейфа судна, вертикального профиля температуры воды.

Основой РЛ комплекса являлась судовая навигационная РЛС ("Дон" 1985 г., "Наяда" 1987 г.), сопряженная со специализированным блоком обработки сигнала (измерителя рассеяния при малых углах скольжения) и устройством географической привязки (УГП). Блок обработки сигнала и УГП формировали на рассеивающей поверхности 20-элементную пространственную решетку, положение которой в азимутальной плоскости стабилизировано с точностью не хуже 1° относительно направления на север. Элементы решетки располагались в наветренном секторе раствором 64° на дальностях 180–1100 м. Размеры рассеивающих участков поверхности определялись длительностью зондирующего импульса (0,125 мкс), шириной диаграммы направленности антенны РЛС в азимутальной плоскости (1°) и при угле облучения $0,9 - 5,4^\circ$ составляли соответственно от $22,5 \times 19$ м² до $22,5 \times 3$ м².

Многоканальная система сбора информации обеспечивала синхронную регистрацию данных, поступающих со всего комплекса аппаратуры.

Внутренние волны идентифицировались по колебаниям температуры распределенного датчика (РД) длиной 50 м, располо-

женного в сезонном термоклине. Точность регистрации вариаций интегральной температуры датчиком была не хуже $0,01^\circ\text{C}$. Смещения термоклина η определялись по флуктуациям температуры РД.

Скорость ветра измерялась чашечным анемометром МС-13 с фотоэлектрическим съемом информации. Он располагался на выносной стреле в 6 м от носа судна и 7 м от уровня воды.

ГЛАВА 2. СВЯЗЬ ХАРАКТЕРИСТИК РЛ СИГНАЛА С ПАРАМЕТРАМИ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ.

В главе 2 оценивается связь между интегральными и статистическими характеристиками РЛ сигнала и параметрами морского волнения.

В § 2.1 приведены результаты измерений модуляционных характеристик РЛ сигналов, рассеянных морской поверхностью под малыми углами скольжения. Модифицированная модуляционная передаточная функция (ММГФ) M для дистанционного определения параметров длинных волн была определена (Plant, Keller, Gross, 1983) как

$$M(f) = \left[\tilde{S}_p(f) / S_\gamma(f) \right]^{1/2}, \quad \tilde{S}_p(f) = S_p(f) / P_0^2,$$

где $\tilde{S}_p(f)$ - модуляционный спектр РЛ сигнала; S_p , $S_\gamma(f)$ - автоспектры мощности рассеянного сигнала и углов наклона морской поверхности; P_0 - средняя мощность рассеянного сигнала. Интегральный по углу спектр наклонов $S_\gamma(f)$ определялся по спектру вертикальных ускорений поверхности $S_a(f)$, измеренному акселерометрическим датчиком: $S_\gamma(f) = k^2(f) \cdot S_a(f) \cdot (2\pi \cdot f)^{-4}$, где k - волновое число поверхностных волн. Величина $\tilde{S}_p(f)$ измерялась при ГП и ВП излучения.

Наблюдается взаимутальная изотропия \tilde{S}_p на обеих поляризациях. ММГФ для ВП в среднем в 1,5 раза ниже, чем для ГП. Величина M спадает с частотой: $M \sim f^{-1,5}$. Оценки коэффициента вариации k_v для обеих поляризаций обладают высокой устойчивостью для различных условий наблюдений (разные метеоусловия и углы облучения в вертикальной и горизонтальной плоскостях) и составляют: $k_v^2 = 0,42 \pm 0,11$ для ВП и $0,7 \pm 0,14$ для ГП.

В § 2.2 анализируется подход к выбору информативного

параметра поверхности для скользких углов облучения и ГП излучения. Особенностью рассеянного сигнала для этих условий, не объяснимой в рамках двухмасштабной модели "рябь на крупной волне", является наличие всплесков, связываемых с процессом обрушения ветровых волн (Калмыков, Пустовойтенко, 1974, 1976). Исследованы статистические характеристики всплесков РЛ сигнала. Экспериментальные распределения амплитуд всплесков правее максимума хорошо описываются экспоненциальным законом. Вид распределения сохраняется при различных гидрометеорологических условиях и азимутальных направлениях облучения поверхности.

На основании совпадения видов распределений длин обрушений l_1 ветровых волн (Бондур, Шарков, 1986) и амплитуд всплесков РЛ сигнала I_1 делается предположение о связи I_1 с проекциями τ_i величины l_1 на направление, перпендикулярное направлению облучения θ

$$I_1 \sim \hat{m} \cdot \tau_i + \sigma_p, \quad (1)$$

где \hat{m} - нормирующая константа, σ_p - брегговская компонента рассеяния.

Предложена модель распределения длин обрушений ветровых волн. Описание характеристик обрушений проводится в предположении пороговой модели (Snyder, Kennedy, 1983): в точке (x, y, t) происходит обрушение, если вертикальное ускорение в ней ξ превышает критический уровень ξ_c , составляющий долю g - ускорения свободного падения ($\xi \geq \mu \cdot g$) (Koga, 1984). Поскольку для реальных условий параметр $\delta = \xi_c / (\overline{\xi^2})^{1/2} \gg 1$ (где $\overline{\xi^2}$ - дисперсия ускорений поверхности), области, в которых происходят обрушения, рассматриваются как выбросы случайного гауссового поля. Тогда кривая распределения аппроксимируется отрезками двух кривых: первого приближения $\rho_1(l)$ и экспоненты $\rho_2(l) = \rho \cdot \exp(-\alpha \cdot l)$ (Левин, 1974). Величины τ_1 и l_1 связаны: $\tau_1(\theta) = l_1(\hat{\theta}) \cdot r(\theta)$, где $\hat{\theta}$ - направление, перпендикулярное направлению θ ; $r(\theta)$ - коэффициент, определяемый распределением $\rho(\varphi_0)$ ориентаций обрушений φ_0 :

$$r(\theta) = \frac{4}{\pi \cdot \gamma} \int_{-\pi/2+\theta}^{\pi/2} \cos(\varphi_0 - \theta) \cdot p(\varphi_0) d\varphi_0 \quad / \quad \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{p(\varphi_0) \cdot d\varphi_0}{[1 - \varepsilon^2 \cdot \cos^2(\varphi_0 - \theta)]^{1/2}}$$

где $\gamma = (m_{oz} / m_{zo})^{1/2}$, $\varepsilon^2 = 1 - \gamma^2$. Среднее значение $\bar{\tau}$ дается выражением

$$\bar{\tau}(\theta) = \frac{2 \cdot \pi}{k_1(\theta)} \cdot \exp(\delta^2 / 2) \cdot [1 - F_1(\delta)] \cdot r(\theta) \quad (2)$$

где $k_1^2(\theta) = m_2(\theta) / \xi^2$, $m_2(\theta) = m_{zo} \cdot \cos^2(\theta) + m_{oz} \cdot \sin^2(\theta)$, $m_{pq} = k_m$

$= \iint k_x^p \cdot k_y^q \cdot \Phi(k_x, k_y) dk_x dk_y$, k - волновое число поверхностных волн, $\Phi(k_x, k_y)$ - спектр ускорений свободной поверхности; $F_1(x)$ - интеграл Лапласа. Выражения для параметров α и ρ распределения $p(\tau)$ определяются из условий непрерывности, нормировки площади под кривыми $\rho_1(\tau)$ и $\rho_2(\tau)$ и равенства первого момента аппроксимирующей функции средней длине $\bar{\tau}$ (2) и имеют вид

$$\alpha = A \cdot \frac{k_2^4(\theta) \cdot J(\delta)}{4 \cdot k_1^2(\theta) \cdot r(\theta)} \cdot \tau_{*} \cdot e_1 \cdot \left[1 - \frac{k_2^4(\theta) \cdot J(\delta)}{k_1^4(\theta) \cdot \delta^2} \cdot (1 - e_1) \right]^{-1} \quad (3)$$

$$\rho = A \cdot \frac{k_2^4(\theta) \cdot J(\delta)}{4 \cdot k_1^2(\theta) \cdot r(\theta)} \cdot \tau_{*} \cdot \exp \left[- \frac{\delta^2 \cdot k_1^2(\theta)}{8 \cdot r^2(\theta)} \cdot \tau_{*}^2 + \frac{\alpha \cdot \tau_{*}}{r(\theta)} \right]$$

где $k_2^4(\theta) = m_4(\theta) / \xi^2 - k_1^4(\theta)$; $m_4(\theta) = m_{zo} \cdot \cos^4(\theta) + 6 \cdot m_{zz} \cdot \sin^2(\theta) \cdot \cos^2(\theta) + m_{oz} \cdot \sin^4(\theta)$; $J(\delta) = (1 + h^2) \cdot F_1(h) + h \sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \exp(-h^2/2)$; $h = \delta \cdot k_1^2(\theta) / k_2^2(\theta)$; A - нормирующий коэффициент, связанный с минимальным значением τ_{*} при котором для реальных РЛ систем реализуются условия для появления всплесков.

Приводится выражение для плотности вероятности ориентаций обрушений ветровых волн

$$\rho(\varphi_0) = \frac{\gamma^4}{4 \cdot E^2(\epsilon)} \cdot \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{d\varphi_n}{\left\{ (1 - \epsilon^2 \cdot \cos^2(\varphi_n)) \cdot [1 - \epsilon^2 \cdot \cos^2(\varphi_n - \varphi_0)] \right\}^{3/2}} \quad (4)$$

где $E(\epsilon)$ - полный эллиптический интеграл 2-го рода. Расчеты по формуле (4) показали хорошее соответствие $\rho(\varphi_0)$ экспериментальным данным (Бондур, Шарков, 1986) как по характеру кривой, так и абсолютному значению.

Зависимость наклонов (α_0) экспериментальных распределений $\rho(I)$ от величин α , рассчитанных по (3) близка к линейной ($\alpha = (0,12 \pm 0,02) \cdot \alpha_0$, коэффициент корреляции 0,99), что в совокупности с совпадением видов распределений $\rho(I)$ и $\rho(\tau)$ подтверждает гипотезу (1).

Показана связь среднего уровня РЛ сигнала R_0 , среднего значения амплитуды всплеска I_0 со средней величиной $\bar{\tau}$, позволяющая описывать интегральные характеристики радиосигнала через параметры обрушений. Предлагаемая модель описывает наблюдаемый в эксперименте характер изменения интенсивности рассеяния в азимутальной плоскости. При сопоставлении экспериментальных данных, рассчитанных по модели, для оценки моментов m_{pq} спектр возвышений морской поверхности задавался в виде $S(k) = \beta \cdot k^{-4}$, $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ - модуль волнового числа.

В § 2.3 приводятся результаты экспериментальных исследований статистических характеристик всплесков РЛ сигналов. Для определения параметров распределений $\rho(\tau)$ (α_t, ρ_t) использовались моменты m_{pq} , рассчитанные по натурным измерениям вертикальных ускорений поверхности. Связь α_t, ρ_t с соответствующими параметрами распределения $\rho(I)$ близка к линейной.

Экспериментальное распределение величин $\hat{I} = I/I_0$ носит универсальный характер и не зависит от условий наблюдений. Значения параметров распределения $\rho(\hat{I})$ составляют: $\alpha = 1,6$; $\rho = 0,9$. При этом для всех серий волнографических измерений параметры распределения $\rho(\tau/\bar{\tau})$ оказались равными и составили $\alpha_t = 1,1$; $\rho_t = 1,2$.

Показано, что средний уровень РЛ сигнала R_0 определя-

ется I_0 и средним числом всплесков в единицу времени N_0 :
 $R_0 \approx I_0 \cdot N_0$. В рамках предлагаемой модели (§ 2.2) получены выражения для N_0 , R_0 в зависимости от скорости ветра W

$$N_0(W) = A \cdot L_w^{-5/2} \cdot \exp\left[-\mu^2 / (\beta \cdot L_w)\right], \quad (5)$$

$$R_0(W) = B \cdot L_w^{-3/2} \cdot \exp\left[-\mu^2 / (\beta \cdot L_w)\right],$$

где A , B - константы, $L_w = 1/n(k_m \cdot g^{-1} \cdot W)$, k_m - максимальное волновое число обрушивающихся волн. Величина N_0 идентифицируется с величиной Π - числом обрушений в единицу времени на единице площади (Дулов, Кудрявцев, 1986). Ветровые зависимости (5) хорошо согласуются с экспериментальными данными.

ГЛАВА 3. ОТОБРАЖЕНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В РЛ СИГНАЛЕ.

В главе 3 приводятся результаты исследования связи РЛ сигнала с параметрами ВВ с целью развития методов РЛ индикации ВВ, а также предлагается феноменологическая модель отображения ВВ в радиосигнале.

В § 3.1 приводятся фоновые гидрометеорологические условия во время проведения экспериментов. Работы проводились в районе Гвианской котловины. В период наблюдений дул устойчивый северо-восточный пассат. Средняя скорость ветра была 9 м/с. Исследования проходили в условиях встречного распространения ветровых и внутренних волн. При прохождении интенсивных ВВ на поверхности наблюдались сулои, характеризующиеся интенсификацией обрушений ветровых волн.

В § 3.2 приводятся оценки параметров ВВ по РЛ сигналу. Вариации радиосигнала отражают структуру смещений термоклина. Спектры РЛ сигнала и колебаний температуры РД подобны. Анализ фазовых спектров сигналов позволяет определить положение зоны интенсивного рассеяния РЛ сигнала, которая находится над задним склоном смещений термоклина и сдвинута на 1,25 рад. от ложбины термоклина вперед по направлению распространения ВВ.

Проводится оценка передаточной функции "ВВ-РЛ сигнал".

Интенсивность ВВ определяется локальной нелинейностью $\epsilon_{\text{в}} = |(2 \cdot \eta_2 - \eta_1 - \eta_3) / (2 \cdot \eta_2 + \eta_1 + \eta_3)|$, где η_1, η_2, η_3 - глубина залегания трех соседних экстремумов смещений термоглина. Аналогично интенсивность проявления ВВ в РЛ сигнале характеризуется величиной контраста $K = |(2 \cdot R_2 - R_1 - R_3) / (2 \cdot R_2 + R_1 + R_3)|$, где R_1, R_2, R_3 - уровни энергии РЛ сигнала в трех соседних экстремумах. Простейшие модели взаимодействия поверхностных и внутренних волн показывают, что вариации спектра ветровых волн определяются параметрами $2 \cdot \pi / (T_{\text{вв}} \cdot \alpha)$, c_0 / c_1 . (здесь α - коэффициент взаимодействия ветра - волн: $\alpha = k_{\text{в}} \cdot W$, $k_{\text{в}}$, c_0 - волновое число и групповая скорость спектральной компоненты; $T_{\text{вв}}$, c_1 - период и фазовая скорость ВВ. Анализ 165 индивидуальных волн дает основание считать, что амплитудную характеристику передаточной функции ВВ - РЛ сигнал $P = K / \epsilon_{\text{в}}$ можно описывать линейной функцией $\epsilon_{\text{в}}$ и $T_{\text{вв}}$:

$$P = (m + n \cdot T_{\text{вв}} \cdot W + r \cdot \epsilon_{\text{в}})^{-1},$$

где $m = (8,9 \pm 3,8) \cdot 10^{-2}$, $n = (5,6 \pm 4,7) \cdot 10^{-6}$, $r = 1,4 \pm 0,2$.

Рассмотрены особенности отображения интенсивных одиночных ВВ ($\epsilon_{\text{в}} \sim 0,4$). Максимум сигнала находится на переднем склоне одиночной волны, интенсивность обратного рассеяния приблизительно в 3 раза превышает средний уровень сигнала. За впадиной одиночной ВВ начинается падение РЛ сигнала и его уровень над задним склоном ВВ в ~ 2 раза ниже "фонового" значения. Время восстановления интенсивности обратного рассеяния до "фонового" уровня $\sim 0,5-1$ час.

В § 3.3 предлагается модель проявления ВВ в РЛ сигнале. Как показано в § 2.3, средний уровень сигнала R_0 зависит от дисперсии ускорений $\overline{\xi^2}$ (5). Если определить контраст РЛ сигнала как $K = \ln(R_{0\text{max}} / R_{0\text{min}})$, где значения R_0 выбираются в соседних максимуме и минимуме, то из (5) следует

$$K \approx \sigma^2 \cdot \Delta \overline{\xi^2} / \overline{\xi^2}, \quad (6)$$

где $\Delta \overline{\xi^2}$ - вариации дисперсий ускорений поверхности. Для определения $\Delta \overline{\xi^2}$ привлекалось решение задачи об изменении спектра волнового действия ветровых волн $\Delta \Phi = \omega^{-1} \cdot \Delta \Phi$ при воздействии

ВВ. С целью получения простого аналитического решения для K , спектр действия Ψ представлен в виде

$$\Psi(k_1, k_2, x) = \begin{cases} \Psi_0 + k_1 \cdot \frac{\partial \Psi_0}{\partial k_1} \cdot G^{-1} \cdot u(x) & \text{при } k \leq k_0 \\ \Psi & \text{при } k > k_0 \end{cases} \quad (7)$$

где $G = c_g + c_1$, $c_g = \partial \omega / \partial k_x$ (ось x направлена по \vec{e}_1), $u(x)$ - скорость течения, индуцируемая ВВ на поверхности. Волновое число k_x разбивает спектр на невозмущенную и эволюционирующую по адиабатическому закону части. Для оценок невозмущенный спектр волнового действия Ψ_0 принят в виде

$$\Psi_0(k_1, k_2) = \delta(\vartheta) \times \begin{cases} 0,5 \cdot \beta \cdot g^{-1/2} \cdot k^{-9/2} & \text{при } k \geq k_0 \\ 0 & \text{при } k < k_0 \end{cases} \quad (8)$$

где ϑ - направление распространения волн, $\delta(\vartheta)$ - дельта-функция, $k_0 = g / W^2$ - волновое число спектрального пика. Из (6) - (8) следует приближенное выражение для РЛ контраста поверхностных проявлений ВВ

$$K = 14 \cdot \beta^{-1} \cdot \mu^2 \cdot \epsilon_n \cdot \ln^{-2} \left(\frac{k_m \cdot W^2}{g} \right) \cdot \left\{ \ln \left[\left(1 + \frac{c_1}{c_{g*}} \right) / \left(1 + \frac{c_1}{c_{g0}} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

где $c_{g*} = c_g(k_*)$, $c_{g0} = c_g(k_0)$.

Для сопоставления модели (9) с экспериментом использован массив из 344 индивидуальных ВВ и соответствующих им проявлений в РЛ сигнале. Коэффициент линейной корреляции зависимости величин K , рассчитанных по (9), от экспериментальных значений $K_{\text{э}}$ равен 0,8. Сопоставление K и $K_{\text{э}}$ показывает, что модель вполне удовлетворительно соответствует эксперименту в широком диапазоне значений РЛ сигнала.

Из анализа экспериментальных данных и модели (9) следует, что эффективность отображения ВВ в контрастах РЛ сигнала падает с увеличением скорости ветра за счет стабилизирующего действия источников и стоков энергии ветровых волн. Увеличение фазовой скорости ВВ (при $T_{\text{вв}} = \text{const}$) приводит к возрастанию РЛ контраста поверхностных проявлений ВВ. Наблю-

дается тенденция роста величины K_{Σ} с увеличением ϵ_{Σ} ; при этом $K_{\Sigma}/\epsilon_{\Sigma} \sim 7$.

Предлагаемая модель (9) качественно верно описывает экспериментальные наблюдения особенностей отображения интенсивных одиночных ВВ в РЛ сигнале.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В заключении содержатся выводы диссертационной работы, которые перечислены в пункте "Основные научные результаты работы и их новизна".

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Оценки параметров внутренних волн по радиолокационному сигналу // Изв.АН СССР, ФАО. -1987.- Т.23.- № 8.- С.877-892. (Совместно с В.М.Бурдюговым, А.И.Верещаком, С.А.Гродским, В.Н.Кудрявцевым).

2. О влиянии внутренних волн на радиолокационный сигнал при малых углах скольжения // Морской гидрофиз. журнал.-1988.-№ 6.- С.3-9. (Совместно с В.Н.Кудрявцевым).

3. Корабельные измерения модуляционных характеристик радиолокационных сигналов, рассеянных морем на волне 3,2 см // Морск. гидрофиз. журн.- 1990.- № 4.- С.50-58. (Совместно с А.Д.Розенбергом).

4. Оценка связи параметров радиолокационного сигнала, отраженного от моря при малых углах скольжения, с характеристиками обрушений ветровых волн // Морск. гидрофиз. журнал.- 1991.- № 6.- С.32-41. (Без соавторов).

5. Комплекс аппаратуры для измерения пространственно-временных характеристик деятельного слоя на масштабах внутренних волн// В кн.: Неконтактные методы и средства измерений океанографических параметров, 1986, М., Гидрометеиздат, - с.48 - 52. (Совместно с А.Н.Большаковым, А.И.Верещаком, В.В.Пустовойтенко, В.Н.Хрусталевым, В.М.Шейном).

6. Радиолокационное изображение морской поверхности на масштабах внутренних волн // В кн.: Неконтактные методы и средства измерений океанографических параметров, 1986, М.,

Гидрометеиздат, - с.53 - 56. (Совместно с А.Н.Большаковым, В.Н.Кудрявцевым, В.В.Пустовойтенко, В.М.Шейном).

7. Исследование отображения параметров крупномасштабных внутренних волн на поверхности океана // Севастополь, 1986, 73 с. (Препринт/ АН УССР МТИ). (Совместно с В.М.Бурдиговым, А.И.Верещаком, С.А.Гродским, В.А.Дуловым, С.И.Клишниковым, В.Н.Кудрявцевым).

8. Радиолокационное изображение морской поверхности на масштабах внутренних волн. Предварительные результаты эксперимента // Методы обработки космической океанологической информации. Севастополь: МТИ АН УССР.- 1983.- С.67- 77. (Совместно с А.Н.Большаковым, А.И.Верещаком, В.Н.Кудрявцевым, Д.В.Терехиным, В.М.Шейном).

9. Пространственно-временной анализ данных РЛ зондирования поверхностных проявлений внутренних волн // М-лы 3 съезда советских океанологов/ физика и химия океана. Л.: Гидрометеиздат, 1987, - С.43. (Совместно с В.М.Бурдиговым, С.А.Гродским, В.Н.Кудрявцевым).

10. Исследования отображения параметров внутренних волн в горизонтально-поляризованном радиолокационном сигнале при малых углах скольжения// М-лы 3 съезда советских океанологов/ физика и химия океана. Л.: Гидрометеиздат, 1987, - С.43. (Совместно с А.И.Верещаком, В.А.Дуловым, В.Н.Кудрявцевым).

В.В.Алекс

Владимир Васильевич Малиновский

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТОБРАЖЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ПОВЕРХНОСТНЫХ И ВНУТРЕННИХ ВОЛН В РАДИОЛОКАЦИОННОМ
СИГНАЛЕ ПРИ МАЛЫХ УГЛАХ СКОЛЬЖЕНИЯ

А в т о р е ф е р а т

Подписано в печать 15.08.92 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1 уч.изд.л.

Заказ Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИГУ "ЭКОСИ - Гидрофизика"

335000, г.Севастополь, ул. Ленина, 28

1. А.Н.

2.

3.

4.

5.

6.

7.

8.

9.

10.

467486

AB 25.606

Handwritten scribble