

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ЩЕРБАКОВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ

УДК 551.465

ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ
ВНУТРЕННИХ ВОЛН
(экспериментальные исследования)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
(04.00.22 - геофизика)

Севастополь

1993



№ 27.104

№ 27.104

Работа выполнена в Морском гидрофизическом институте
АН Украины.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Н. А. Пантелеев

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
В. Н. Кудрявцев
кандидат физико-математических наук
И. Г. Рубан

Ведущая организация: Институт гидромеханики АН Украины

Защита состоится "___" _____ 1993 г. на заседании
Специализированного совета Д 016.01.01 при Морском гидрофи-
зическом институте АН Украины (335 000, г. Севастополь, ул.
Капитанская, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Морского
гидрофизического института АН Украины (335 000, г. Севасто-
поль, ул. Капитанская, 2).

Автореферат разослан "___" _____ 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор физико-математических наук

А. М. Суворов

ЛННБ ім. В. Стефаника
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Работа посвящена изучению характеристик и механизмов изменчивости короткопериодных внутренних волн (ВВ). Внутренние волны играют важную роль в процессах общей циркуляции океана, формировании гидрофизических полей, в процессах вертикального и горизонтального обмена. Они являются неотъемлемым компонентом большей части динамических процессов в океане и представляют собой необходимое звено в передаче энергии от макро к микромасштабным океаническим процессам. Знания о поле реальных ВВ имеют практическое значение для гидроакустики, гидрооптики, гидробиологии, подводного мореплавания; строительства гидротехнических сооружений и решения ряда важных прикладных задач, а также теоретическое значение для понимания процессов вертикального и горизонтального перемешивания в океане, динамики течений, процессов формирования "тонкой" структуры и др.

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в последние годы в исследовании ВВ, многие вопросы динамики ВВ изучены недостаточно. В значительной степени это обусловлено сложностью и дороговизной натуральных исследований поля ВВ, многообразием физических процессов, оказывающих на них влияние, сильной пространственной и временной перемежаемостью поля волн и наконец сложностью приложения существующих теоретических моделей для интерпретации данных натуральных измерений ВВ.

Высокая степень изменчивости короткопериодных ВВ обусловлена рядом физических механизмов в том числе взаимодействием волн с пространственно-неоднородным полем течений, влиянием на волны дифференциально-диффузионной конвекции, действием механизма сдвиговой неустойчивости, ответственного за разрушение низкочастотных колебаний и генерацию высокочастотных цугов ВВ и мелкомасштабной турбулентности.

Успехи в исследовании динамики океана, достигнутые в последнее время, привели к пониманию того, что океан является существенно более неоднородным и динамически активным чем это считалось раньше. В этой связи исследование изменчивости реального поля короткопериодных ВВ представляется

весьма важным.

Цель работы.

Целью настоящей работы является исследование изменчивости реального поля короткопериодных внутренних волн в различных районах и условиях океана, включая процессы взаимодействия внутренних волн и тонкой термохалинной структуры, а также анализ действия в натуральных условиях механизма сдвиговой неустойчивости как важнейшего механизма стока энергии внутренних волн в океане.

В ходе выполнения работы решались следующие задачи: проведение измерений и анализ изменчивости гидрофизических полей в диапазоне масштабов внутренних волн;

на основе измерений, выполненных с помощью пространственно - распределенной автономной буйковой станции, исследование сдвиговой неустойчивости в натуральных условиях;

проведение специализированного эксперимента по исследованию влияния дифференциально-диффузионной конвекции на внутренние волны, а также моделирование этого процесса;

исследование пакетного характера распространения короткопериодных внутренних волн.

Научная новизна и практическая ценность результатов.

В работе приведены результаты измерений пространственно-временных масштабов неоднородностей поля скорости течения и плотности, вызванных сдвиговой неустойчивостью. Определен вклад, который вносят движения различных масштабов, в создание критического сдвига скорости. Определен объем зоны перемешивания и выполнены оценки волновой энергии, затраченной на перемешивание. Показано, что на прослойках, возникающих в результате обрушения неустойчивых высокочастотных возмущений может быть сосредоточен большой локальный сдвиг скорости, что в свою очередь создает условия благоприятные для развития неустойчивости.

Исследовано, обнаруженное в натуральных экспериментах, понижение энергии колебаний горизонтальной скорости ВВ в слое хорошо выраженной ступенчатой структуры в западной части тропической Атлантики. Выполнено численное решение уравнения ВВ с учетом коэффициентов турбулентной вязкости и профиля

частоты Брента-Вьясяля, моделирующего термоклин. Показано, что учет турбулентной вязкости приводит к некоторой трансформации вертикального профиля скорости в волнах и в результате к перераспределению энергии волновых колебаний по глубине.

Исследована изменчивость поля короткопериодных ВВ, связанная с воздействием на поверхность океана крупных атмосферных возмущений - тайфунов. Показано, что в результате такого возмущения происходит возбуждение инерционных колебаний во всей толще океана и связанная с ними генерация ВВ меньших масштабов. Зарегистрированы пакеты высокочастотных внутренних волн, появляющиеся с инерционным периодом.

Рассмотрено взаимодействие ВВ с пространственно-неоднородным полем течения, создаваемым вихревым образованием в Черном море. Обнаружена анизотропия и интенсификация короткопериодных ВВ, распространяющихся на встречном течении.

Исследованы характеристики пакетов ВВ. Показано, что короткопериодные ВВ характеризуются высокой перемежаемостью энергии, а пакеты имеют узконаправленный характер распространения.

Результаты работы могут быть использованы для построения теоретических моделей ВВ, при решении практических задач подводного мореплавания, для прогноза изменчивости гидрофизических полей.

Апробация результатов.

Основные результаты работы докладывались на Всесоюзной научно-технической конференции "Вклад молодых ученых и специалистов в решение современных проблем океанологии" (Батилиман, 1986), Всесоюзной школе семинаре "Актуальные проблемы океанологии" (Ленинград, 1987), III съезде советских океанологов (Ленинград, 1987), III научно-технической конференции Крыма "Вклад молодых ученых и специалистов в решение современных проблем океанологии и гидробиологии" (Севастополь, 1988), совещаниях по проекту "Микроструктура" (Ялта, 1987), а также на научных семинарах отдела турбулентности Морского гидрофизического института АН Украины (Севастополь, 1982-1992).

По теме диссертации опубликовано 14 научных работ.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения четырех глав, заключения, списка литературы из 82 наименований и содержит 155 страниц, включающие 47 рисунков и 1 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цели исследования, отмечена актуальность темы, указана новизна полученных результатов и кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава посвящена методике измерений и обработки данных. Описаны способы организации и проведения натуральных экспериментов, направленных на изучение ВВ. При исследовании ВВ большой интерес представляет получение их пространственно-временных характеристик в коротковолновом диапазоне. Описана методика постановки пространственно-распределенной буйковой станции (ПРАБС), позволяющей получать временные ряды измерений скорости течения и температуры в точках, разнесенных на расстояния от нескольких десятков метров до километров по горизонтали.

Рассмотрены характеристики измерителей скорости течения и температуры, использовавшихся при проведении экспериментов: ДИСК, ДКСТ, ПЮТОК, ЦИИТ-3, а также зонда "Комплекс-1", предназначенного для проведения измерений вертикальной тонкой структуры гидрофизических полей.

Описана методика обработки данных с помощью числовой фильтрации, а также алгоритмы спектрального анализа.

Приводится методика выделения на реализациях скорости и температуры участков, соответствующих прохождению пакетов ВВ. Для анализа временной изменчивости энергии волновых колебаний используются методы узкополосной фильтрации. Разделение колебаний на пакеты и фоновые осцилляции проводится на основе сравнения значений текущей дисперсии и среднего уровня дисперсии, рассчитанных в определенном диапазоне частот. По полученным данным оцениваются коэффициент переменяемости - отношение энергии, содержащейся в пакетах, к общей энергии волновых колебаний данного частотного диапазона, коэффициент анизотропии и угол φ_0 , соответствующий максимальному значению дисперсии $S^2(\varphi)$.

Во второй главе исследуются характеристики и условия возникновения пакетов короткопериодных ВВ в различных районах океана и Черном море.

Проведен анализ взаимодействия ВВ с пространственно-неоднородным течением, при прохождении через район работ в прибрежной части Черного моря вихревого образования. Распространение вихря было зафиксировано по измерениям скорости и температуры на автономных буйковых станциях (АБС), по данным гидрологических съемок района работ и при проведении временной серии вертикальных зондирований тонкой структуры с борта заякоренного судна. Обработка всей совокупности экспериментальных данных позволила определить направление и скорость перемещения антициклонического вихревого образования. Горизонтальный размер вихря составлял 20 км, скорость его перемещения - 10 см/с. Горизонтальные градиенты скорости в вихре достигали величины порядка 5 см/с км. Прохождение вихревого образования сопровождалось генерацией короткопериодных ВВ. Возбуждаемые пакеты ВВ имели выраженный анизотропный характер. Показано, что направление распространения большей части пакетов нормальное к скорости течения.

Обсуждается возможность генерации пакетов ВВ вертикальным сдвигом скорости, создаваемым вихрем.

Рассматривается изменчивость поля короткопериодных ВВ, связанная с воздействием крупных атмосферных возмущений тайфунов. Сразу после прохождения тайфуна, во всей толще океана развиваются инерционные колебания и возникают всплески высокочастотных ВВ, появляющиеся с инерционным периодом. Продолжительность пакетов ВВ меняется в пределах от 6 до 14 часов, периоды колебаний в пакетах - 0.5 - 3 часов. Показано, что высокочастотные волны, распространяющиеся в виде пакетов, могут быть обусловлены разрушением инерционных движений, вследствие сдвиговой и адвективной неустойчивостей.

Исследуются характеристики пакетов короткопериодных ВВ в западной части тропической Атлантики. Сделаны оценки направления распространения пакетов, коэффициентов перемежаемости и анизотропии. Показано, что периодическое увеличение энергии высокочастотных колебаний вызвано прохождением через

район работ каждые 12 часов интенсивных пакетов ВВ с периодом колебаний 20-30 мин. Пакеты генерируются приливными колебаниями в районе подтема Сиара.

Близкая к суточной периодичность появления интенсивных пакетов ВВ была зарегистрирована в северо-западной части тропической Атлантики на глубине 4000 метров. Амплитуда 20-40 минутных колебаний достигала при этом значений 15 см/сек.

Третья глава посвящена исследованию действия в природных условиях океана механизма сдвиговой неустойчивости. Представлено описание комплексных экспериментов, проведенных в восточной и западной частях тропической Атлантики.

В эксперименте, выполненном в восточной части тропической Атлантики, область неустойчивости возникает в результате совместного действия сдвигового потока и внутренних волн различных масштабов. Относительный вклад различных движений в создание критического сдвига скорости приблизительно оценивается следующим образом: средний поток 25%, инерционное колебание 50%, приливные колебания 5%, 70-минутные волны 15%. Оставшаяся малая доля (5%) относится за счет действия внутренних волн других масштабов.

Сверхкритический сдвиг скорости привел к быстрому нарастанию неустойчивых возмущений, имеющих вид ярко выраженного цуга высокочастотных интенсивных колебаний. Цуг состоял из трех-пяти 5-7 минутных колебаний. Размах этих пульсаций скорости не уступал размаху инерционных движений с периодом 170 часов. Скорость и направление распространения цуга были близки к величине и направлению среднего вектора скорости течения в слое максимальных вертикальных сдвигов скорости. Прохождение цуга было зарегистрировано всеми приборами, размещенными вдоль линии ПРАВС, протяженность которой составляла 2 км. Вслед за этим, по-видимому, произошло обрушение пакета волновых колебаний. Зондирования, проведенные в соответствующий момент времени, показывают двуслойную структуру термоклина с "разрывом" его в середине узким слоем с пониженным локальным градиентом плотности. В результате обрушения образуется зона перемешивания с ориентировочно определенными размерами $300 \times 3000 \times 6 \text{ м}^3$.

Выполнена оценка энергетического баланса процесса обру-

жения, возникающего в результате сдвиговой неустойчивости.

Результаты измерений в западной части тропической Атлантики также свидетельствуют о действии механизма сдвиговой неустойчивости. Совместная обработка данных измерений позволила однозначно совместить поля скорости и плотности, полученные соответственно на АВС и по серии зондирований, выполненных в непосредственной близости от АВС (1 миля). Выявлена закономерность возрастания амплитуды короткопериодных внутренних волн с увеличением сдвига скорости. Показано, что основной вклад в вертикальный сдвиг скорости вносят инерционные колебания.

Установлено, что на прослойках, образующихся вследствие обрушения высокочастотных неустойчивых колебаний, может быть сосредоточен большой локальный сдвиг скорости, что в свою очередь создает благоприятные условия для развития неустойчивости.

Рассматривается модель развития сдвиговой неустойчивости, вызванной поворотом нестационарного вектора скорости с глубиной. Выполнено сравнение экспериментальных и теоретических результатов.

В четвертой главе исследуется взаимодействие ВВ с тонкой термохалинной структурой. Предположение о том, что перемешивание в конвективных слоях может являться значительным стоком энергии ВВ высказывалось в ряде работ /Padman, 1989, Schmitt, 1991, Ruddick, 1991/.

Представлены материалы эксперимента, выполненного в северо-западной части тропической Атлантики в районе, характеризующемся наличием интенсивной термохалинной структуры. "Ступеньки" занимали слой от 250 до 400 метров. Обнаружено, что амплитуда колебаний горизонтальной скорости высокочастотных ВВ в слое "ступенек" существенно ниже, чем на других горизонтах.

Расчет дисперсионных кривых и собственных функций внутренних волн, выполненный с учетом профиля частоты Вэйс-ля-Брента, полученного в эксперименте, показал, что реальное наблюдавшееся в океане распределение амплитуды колебаний горизонтальной скорости по глубине, не соответствует данным такого расчета.

Обсуждается возможность затухания в слое ступенчатой структуры ВВ с большими вертикальными волновыми числами.

Проведены расчеты дисперсионных кривых внутренних волн при учете коэффициентов горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости для экспоненциально стратифицированного океана. Показана зависимость формы дисперсионных кривых от величин коэффициентов горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости.

Расчет возможного влияния коэффициентов турбулентной вязкости на характеристики ВВ проводится на основе численного решения краевой задачи для уравнения для ВВ с учетом профиля частоты плавучести, моделирующего термоклин и коэффициентов вертикальной и горизонтальной турбулентной вязкости:

$$W \frac{\partial^4}{\partial z^4} - \left(\alpha^2 + \frac{\omega}{K_V^{(z)}} + \frac{K_V^{(h)}}{K_V^{(z)}} \alpha^2 \right) W \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\alpha^2}{K_V^{(z)}} \left(\omega + \frac{N^2}{\omega} + K_V^{(h)} \alpha^2 \right) W = 0$$

с граничными условиями на поверхности и на дне: $W(0) = W(H) = 0$, $d^2W/dz^2|_{z=0} = 0$, $dW/dz|_{z=H} = 0$. Здесь $W(z)$ - вертикальная скорость во ВВ, $N(z)$ - частота плавучести, $\omega = \omega_r + i\omega_i$, где ω_r - декремент затухания, ω_i - частота колебаний, $\alpha = (K_x^2 + K_y^2)^{1/2}$ - горизонтальное волновое число, $K_V^{(z)}$, $K_V^{(h)}$ - коэффициенты вертикального и горизонтального турбулентного обмена.

Показано, что учет турбулентной вязкости приводит к определенному изменению формы собственных кривых $U(z)$, $W(z)$ ВВ. При этом происходит перераспределение энергии колебаний горизонтальной скорости по глубине.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

1. Проанализированы различные механизмы генерации высокочастотных пакетов внутренних волн. Показано, что возбуждение пакетов внутренних волн может быть обусловлена взаимодействием фонового поля внутренних волн с полем течений, создаваемым вихревыми образованиями в море, а также адвективной и сдвиговой неустойчивостью инерционных колебаний.

2. Экспериментально исследовано развитие сдвиговой неустойчивости и обрушение ВВ, определены основные параметры этого явления. Неустойчивость возникает в результате совместного действия сдвигового потока и внутренних волн различных масштабов; производится оценка вклада различных дви-

жений. Область перемешивания, возникающая вследствие обрушения пакета неустойчивых колебаний, занимает объем $5,5 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, энергия ВВ, затрачиваемая на перемешивание воды составляет $1,6 \cdot 10^4$ эрг/см.

3. Установлено, что на прослойках, возникающих в результате обрушения высокочастотных колебаний, может быть "сосредоточен" большой локальный сдвиг скорости, что в свою очередь создает благоприятные условия для развития неустойчивости.

4. Исследовано, обнаруженное в натуральных экспериментах, понижение энергии колебаний горизонтальной скорости внутренних волн в слое выраженной ступенчатой структуры в западной части тропической Атлантики.

5. Численное решение уравнения ВВ показало, что учет турбулентной вязкости приводит к изменению формы вертикальных профилей скорости $U(z)$, $W(z)$ внутренних волн. Подстановка реальных значений коэффициента турбулентной вязкости показывает, что смещение перегиба функций $U(z)$ для ВВ первой моды и реальных глубин океана составляет величину порядка нескольких метров.

6. Проанализированы характеристики пакетов высокочастотных внутренних волн. Показано, что короткопериодные внутренние волны характеризуются высокой перемежаемостью энергии, а пакеты имеют узконаправленный характер распространения.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

1. Чертушкин А. Г., Щербаков А. Н. Об одном методе синтеза цифровых фильтров для обработки данных. - В кн.: Внутренние волны и турбулентность. Севастополь, 1984. - С. 18-25.

2. Самодуров А. С., Щербаков А. Н. Особенности флуктуации гидрофизических параметров в диапазоне частот внутренних волн на Амазонском полигоне. - В кн.: Внутренние волны и турбулентность. Севастополь, 1984. С. - 48-56.

3. Никитин С. В., Морозов Е. Г., Шаповалов С. М., Щербаков А. Н. Реакция океана на прохождение тайфунов. - В сб.: Океанологические исследования. Под ред. Курта В. Г. и Морозова Е. Г. М., 1985, том 37. - С. 60-68.

4. Охотников И. Н., Щербаков А. Н. Исследование временной перемежаемости высокочастотных пакетов внутренних волн. - Морской гидрофизический журнал, 1987, N 2. С. 45-51.

5. Слепышев А. А., Шамо В. С., Щербаков А. Н. О влиянии средних течений на дисперсионные свойства гравитационных внутренних волн. - Деп. В ВИНТИ 29.05.87, N 3846-В87, С 8.

6. Щербаков А. Н. Проявление сдвиговой неустойчивости в океане. - Тезисы докл. I Всесоюзная школа-семинар "Актуальные проблемы океанологии", Л., 1987. - С. 62-63.

7. Белобров А. А., Слепышев А. А., Шамо В. С., Щербаков А. Н. Процессы переноса обусловленные волнами. - Тезисы докл. I Всесоюзная школа-семинар "Актуальные проблемы океанологии", Л., 1987. - С. 120-121.

8. Белобров А. А., Слепышев А. А., Шамо В. С., Щербаков А. Н. Процессы переноса обусловленные слабонелинейными внутренними волнами. - Тезисы докл. III съезд советских океанологов, секция физики и химии, Л., 1987. - С. 27-28.

9. Белобров А. А., Слепышев А. А., Шамо В. С., Щербаков А. Н. Процессы переноса обусловленные слабонелинейными внутренними волнами. - Морской гидрофиз. журнал, 1988, N 4. - С. 24-32.

10. Белобров А. А., Слепышев А. А., Шамо В. С., Щербаков А. Н. Перенос массы внутренними волнами. - Изв. АН СССР, ФАО, 1989, т. 25, N 1. - С. 64-72.

11. Щербаков А. Н. Наблюдение процессов перемешивания в верхнем слое океана. - В сб.: Исследование тонкой структуры гидрофизических полей в тропической и субтропической зонах Атлантики. 49 рейс НИС "Михаил Ломоносов" (МГИ АН Украины). Севастополь, 1988, деп. ВИНТИ 17.01.89, N 378-В89. - С. 183-193.

12. Слепышев А. А., Шапов В. С., Щербаков А. Н. О некоторых особенностях групповой скорости внутренних волн в океане. - В сб.: Исследование тонкой структуры гидрофизических полей в тропической и субтропической зонах Атлантики. 49 рейс НИС "Михаил Ломоносов" (МГИ АН Украины). Севастополь, 1988, деп. ВИНТИ, 17.01.89, N 378-В89. - С. 264-271.

13. Пантелеев Н. А., Щербакова Е. Н., Щербаков А. Н. Наблюдение гидродинамической неустойчивости в океане. - Изв. АН СССР, ФАО, 1989, т. 25, N 6. - С. 616-625.

14. Пантелеев Н. А., Щербаков А. Н. Наблюдение антициклонического образования в прибрежной части Черного моря. - Морской гидрофиз. журнал, 1990, N 3. - С. 55-59.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ЩЕРБАКОВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ

ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ
ВНУТРЕННИХ ВОЛН
(ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ)

А в т о р е ф е р а т

Подписано в печать . 93 г.
Формат бумаги 60*90 1/16 Объем 1 уч. изд. л.
Заказ 378 Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИФУ "ЭКОСИ - Гидрофизика"
335000, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

ИФУ "ЭКОСИ - Гидрофизика"
335000, г. Севастополь

Ms. A. 5. 103

464828

