

На правах рукописи



**Новотрясов Вадим Васильевич**

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ  
ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ ОКЕАНА**

25.00.28 - океанология

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

Владивосток – 2006

Работа выполнена в Тихоокеанском океанологическом институте  
им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, г. Владивосток

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Г.В. Алексеев

доктор физико-математических наук,  
профессор Т.Р. Кильматов

доктор физико-математических наук,  
И.О. Яроцук

Ведущая организация: Институт автоматки и процессов  
управления ДВО РАН, г. Владивосток

Защита состоится 8 декабря 2006 года в 14 часов на заседании  
Диссертационного совета Д 005.017.02 при Тихоокеанском океанологическом  
институте им. В.И. Ильичёва ДВО РАН  
по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тихоокеанского океаноло-  
гического института им. В.И. Ильичёва ДВО РАН

Автореферат разослан

6 октября 2006 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

кандидат географических наук



Ф.Ф. Храпченков

**Введение.** В динамике прибрежной зоны океана значительную роль играет особая разновидность волновых движений, существенно связанных с одной стороны - с плотностной стратификацией, а с другой - с вращением Земли и наличием боковой границы. К первому классу относятся внутренние гравитационные волны, второй класс представлен длинноволновыми движениями вращающегося океана, локализованными в его краевой зоне, и наиболее энергоёмкими из этого типа волнового движения - внутренними волнами Кельвина [7, 9, 22]. Исследование указанных волновых движений имеет большое значение в силу того, что именно они, главным образом, формируют мезомасштабную изменчивость гидрофизических полей в указанной области, вызывают апвеллинг и неустойчивость вдольбереговых течений, оказывают существенное влияние на генерацию и изменчивость ветровых течений [16, 22, 29, 31]. Кроме того, внутренние волны обоих типов во многом определяют особенности распространения акустических сигналов [14], переноса примесей [32], миграцию биологических сообществ [16, 30] и оказывают влияние на состояние морской поверхности [10, 14]. Их необходимо учитывать и при разработке новых и совершенствовании имеющихся методов исследования океана из космоса. Все перечисленные факторы определяют актуальность изучения динамики внутренних волн (ВВ) в прибрежной зоне морей и океана.

Разнообразие источников возбуждения (ветер, флуктуации давления), наличие различного рода неоднородностей (у рельефа дна и береговой черты) усиливают случайную составляющую волнового поля, усложняя его адекватное описание. Одним из наиболее эффективных методов анализа случайного волнового движения является спектральный метод [3, 18]. Спектральные характеристики волнового поля зачастую позволяют идентифицировать основные механизмы его формирования с различными пространственно-временными масштабами. Экспериментальные исследования показывают, что в прибрежной зоне океана поле ВВ нелинейно, нестационарно и неоднородно [24, 25]. Указанные особенности затрудняют использование «традиционного» спектрального анализа [3, 18] для исследования и интерпретации натуральных наблюдений за ВВ. В этой связи достаточно актуальной представляется задача определения пространственно-временных масштабов, в пределах которых поле ВВ может быть охарактеризовано как стационарное и однородное в широком смысле. Возможность такого подхода оправдывается тем, что в первом приближении по параметру нели-

нейности нестационарность и неоднородность ВВ является «плавной», т.е. изменение амплитуды волны  $\delta A$  на расстоянии равном её длине мало ( $\delta A/A \ll 1$ ). В рамках такого приближения для исследования ВВ разумно воспользоваться теорией нелинейных случайных волн [2, 4, 5].

В последнее время наметилось ещё одно направление в исследованиях ВВ прибрежной зоны, для которого использование аналитических методов весьма актуально. Это так называемая проблема замкнутого описания эволюции случайных нелинейных ВВ. Её суть состоит в следующем. По ряду причин нелинейные ВВ в прибрежной зоне являются случайными. Известно, что слабодисперсные нелинейные случайные волны могут находиться, в том числе, и в режиме сильной волновой турбулентности [2]. Дать замкнутое статистическое описание различных стохастических режимов в ансамбле случайных нелинейных ВВ, проследить эволюцию такого ансамбля от начального состояния до развитой турбулентности, изучить влияние гидрологических условий на развитие этих режимов без использования аналитических методов достаточно проблематично.

Актуальность представленной работы, основанной на натуральных наблюдениях, усиливается дефицитом экспериментальных исследований ВВ, вызванном техническими трудностями, связанными с проведением экспериментальных исследований в прибрежной зоне. Вместе с тем, небольшие глубины (<100м) и значительные амплитуды ВВ, близость пикноклина ко дну или к поверхности, наличие течений и т.д. превращают прибрежную зону в полигон, где особенно выразительно проявляются нелинейные свойства ВВ. Тем самым указанная зона может служить природным полигоном для тестирования теоретических моделей этого волнового процесса, и в тоже время исследование ВВ в этих зонах может быть стимулирующим фактором развития теории нелинейных волн в океане.

Целью данной работы является разработка и экспериментальная проверка ряда достаточно простых математических моделей, пригодных для описания и анализа динамики внутреннего волнения в прибрежной зоне океана с учётом его нелинейности и случайности. Реализация намеченной цели осуществлялась путём решения трёх основных задач, каждая из которых потребовала создания соответствующих математических моделей.

Эти задачи:

1. Изучение динамики случайных нелинейных внутренних волн в мелком море с произвольным распределением плотностной стратификации по глубине, с учётом диссипации, неоднородностей рельефа дна, наличия боковой границы.
2. Разработка методики анализа вертикальной структуры нелинейных случайных внутренних волн, адаптированной к натурным условиям.
3. Экспериментальная проверка основных положений и выводов, полученных с помощью предложенных моделей случайного нелинейного внутреннего волнения в краевых областях океана.

Здесь и далее под математической моделью подразумевается совокупность дифференциальных или интегральных уравнений с соответствующими краевыми условиями и аналитического или численного алгоритма точного или приближённого решения задачи. При построении всех специализированных моделей исходным является представление о краевой зоне океана, глубина которой много меньше характерного горизонтального масштаба  $BB$ , расположенной на  $f$ -плоскости, ограниченной боковой границей, с неоднородным рельефом дна, заполненной вязкой жидкостью с произвольной плотностной стратификацией.

Первая группа моделей представлена в главе 1 и предназначена для изучения динамики нелинейных  $BB$ , в том числе в краевых зонах. Использование модельных уравнений этой группы ограничено приближениями гидростатики:  $\omega \ll N$ . ( $\omega$  - частота  $BB$ ,  $N$  - максимальное значение частоты Вэйсяля-Брента) и квадратичной нелинейности. В работе показано, что в рамках этих приближений поле  $BB$  можно представить в виде суперпозиции нормальных мод с горизонтальной структурой, которая задаётся нелинейным уравнением Бюргерса, и вертикальной структурой, определяемой линейной краевой задачей на собственные значения. Модели имеют аналитический характер и используют технику асимптотических разложений.

Вторая группа моделей представлена в главе 2 и предназначена для решения задач замкнутого статистического описания случайных нелинейных  $BB$ : построение кинетических уравнений для различных моментов поля, их решение и анализ. В основе этой группы моделей положено уравнение Бюргерса со случайными краевыми условиями.

Для анализа вертикальной структуры случайных нелинейных ВВ используется модель, в основу которой положен метод эмпирических ортогональных функций. Последние представляют собственные функции интегрального уравнения, ядро которого представляет корреляционная функция поля вертикальных смещений изопикн во внутренних волнах.

**На защиту выносятся следующие положения и научные выводы:**

1. Предложенные в настоящей работе математические модели решают сформулированные основные задачи.

1а. Гидростатическая модель ВВ в мелком море с квадратичной нелинейностью позволяет исследовать характерные особенности трансформации горизонтальной структуры и взаимодействия ВВ при произвольной стратификации плотности, различного типа турбулентной вязкости, плавных неоднородностей рельефа дна, наличии боковой границы с учётом их нелинейности и случайности.

1б. Предложенная методика анализа вертикальной структуры случайных нелинейных ВВ, основанная на методе эмпирических ортогональных, учитывает случайный характер волнового поля и позволяет замкнуть схему анализа горизонтальной и вертикальной структуры ВВ в прибрежной зоне океана.

2. Все модели опробованы на частных задачах экспериментального или теоретического характера. Путём обобщения полученных с помощью различных моделей и не противоречащих друг другу результатов делаются сформулированные ниже выводы:

2а. В краевой области океана с плавными неоднородностями рельефа дна, расположенной на  $f$ -плоскости и заполненной вязкой, стратифицированной жидкостью адаптация начального возмущения пикноклина конечной амплитуды в общих чертах происходит следующим образом: возмущение единственным образом разделяется на геострофическую - «медленную» и волновую - «быструю» компоненты движения. Быстрая компонента в виде нелинейного возмущения, сосредоточенного в окрестности боковой границы распространяется вдоль неё так, что граница остаётся справа, т.е. быстрая компонента представляет нелинейную внутреннюю волну Кельвина, динамика которой определяется уравнением Бюргерса.

2б. В мелком море с квадратичной нелинейностью и малой диссипацией спектральная структура внутреннего волнения определяется самовоздействием и нели-

нейным взаимодействием его спектральных компонент. В результате самовоздействия спектр интенсивности вертикальных смещений фиксированной изопикны  $\zeta$  становится неоднородным с универсальной степенной асимптотикой  $S p_{\zeta}(x; \omega) \sim \omega^{-p}$ , где  $p = 3$  - наклон спектра. В результате взаимодействия внутреннего прилива с высокочастотным волнением у спектра последнего формируется область частот, в которой спектр неоднороден, а его асимптотика имеет вид  $S p_{\zeta}(x; \omega) \sim \omega^{-p}$ , где  $p = 1$ . Взаимодействие узкополосного синоптического шума и внутреннего прилива существенно зависит от коэффициента шумовой модуляции  $M$ . Для случая  $nM \gg 1$ , где  $n$  - номер гармоники, при  $\omega \rightarrow \infty$ , спектр ВВ неоднороден и спадает по универсальному степенному закону  $S p_{\zeta}(x; \omega) \sim \omega^{-p}$  с наклоном  $p = 3$ , а для противоположного случая  $nM \ll 1$  в спектре можно выделить две характерные области частот, в которых его наклон изменяется от  $p = 3$  до  $p = 2$ .

2в. В мелком море, охваченном нелинейным внутренним волнением, модифицированные амплитудные функции нормальных мод взаимозаменяемы с соответствующими эмпирическими ортогональными функциями интегрального уравнения, ядро которого представляет корреляционная функция вертикальных смещений изоповерхностей поля скалярного параметра  $q$ , с фоновым градиентом  $dq_0/dz \approx C \cdot N_0(z)$ ,  $N_0$  - частота Вэйсяля-Брента,  $C$  - константа.

**Практическая значимость работы.** Проведенные исследования имеют непосредственное приложение в задачах исследования динамики ВВ и мезомасштабной изменчивости гидрологических полей в прибрежной зоне океана. Натурные эксперименты дали обширный материал для проверки существующих и предложенных математических моделей ВВ и оценки их применимости. При проведении дальнейших исследований могут быть полезны методические аспекты работы, в частности, методика анализа вертикальной структуры внутренних волн.

Полученные результаты вошли в отчёты по госбюджетным темам Тихоокеанского института океанологии им. В. И. Ильичёва ДВО РАН по контрактам Министерства промышленности, науки и технологий РФ, по ФЦНТП «Комплексные исследования океанов и морей Арктики и Антарктики» и ФЦП «Мировой океан» подпрограмма «Исследование природы Мирового океана», а также в отчёты по проектам РФФИ: 96-01-00156; 98-05-65371; 02-05-64277; 04-05-65271.

**Достоверность полученных результатов** обоснована внутренней непротиворечивостью предложенных математических методов, их тестированием на целом ряде известных классических задач и согласием результатов проведенного анализа с результатами натуральных экспериментов. Отдельные теоретические и экспериментальные результаты, полученные в работе, не противоречат более ранним исследованиям других авторов и подтверждены в более поздних исследованиях с помощью сопоставления с данными натуральных наблюдений, а также путём воспроизведения одних и тех же эффектов в натуральных и численных экспериментах. Это свидетельствует о научной достоверности сделанных выводов и полученных результатов.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на Всесоюзном симпозиуме по дифракции и распространении волн (г. Винница, сентябрь 1990 г.); на международных конференциях «Потоки и структуры в жидкостях» (Владивосток, сентябрь 1991 г.; Санкт-Петербург, сентябрь 1992 г.; Москва, июнь 2005 г.), 23-м съезде Международного геофизического и геодезического союза IUGG-2003 (Саппоро, Япония, 2003), на 11-й школе-семинаре «Акустика океана» (Москва, май 2004 г.), на семинарах ТОИ ДВО РАН по «Нелинейной динамике».

**Публикации.** Основные результаты диссертации представлены в работах [1-27], причём их подавляющая часть опубликована – в журналах «Известия РАН. Физика атмосферы и океана», «Океанология», «Метеорология и гидрология». Список работ приведён в конце автореферата.

**Личный вклад автора.** В диссертации обобщены результаты экспериментальных и теоретических исследований, выполненных в 1989-2005 годах автором в Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичёва ДВО РАН. Работы [7, 9-12, 18, 35] сделаны автором единолично, прочие в соавторстве. Во всех совместных работах автору принадлежит постановка задачи и выбор метода решения, а также паритетное участие в интерпретации и проведении экспериментальных исследований. Всё изложенное в настоящей работе отражает точку зрения автора и полностью лежит на его ответственности.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы и содержит 284 страниц машинописного текста и 35 рисунков. Список литературы включает 199 наименований, в том числе 92 работ иностранных авторов.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируется предмет исследования, его цели и задачи, обосновывается актуальность и новизна работы. Также дан краткий обзор современного состояния изучаемых проблем, приведено краткое изложение представленных в диссертации результатов.

Значительные амплитуды, малая скорость распространения, слабая дисперсия ВВ из частотного диапазона:  $\omega \ll N$ , в прибрежной зоне характеризуют их как наиболее нелинейные волновые движения в океане. Создание универсального описания этого движения осложняется разнообразием типов плотностной стратификации прибрежных вод, наличием вязкости и боковых границ, и рядом других факторов. Его создание целесообразно начать с построения физико-математических моделей, основанных на максимально упрощённых уравнениях. Построению таких моделей посвящена первая глава.

В параграфе 1.1 представлена простейшая модель нелинейных внутренних гравитационных волн (далее просто ВВ) из частотного диапазона  $f \ll \omega \ll N$ . (где  $f, N$  - параметр Кориолиса и характерное значение частоты плавучести) в мелком море с квадратичной нелинейностью. Показано, что поле ВВ в таком море можно представить в виде суперпозиции нормальных мод

$$\zeta = \sum_m \zeta_m(x, t) W_m(z) \quad (1)$$

амплитудные функции, которых представляют решения линейной краевой задачей на собственные значения

$$(d^2 W_m / dz^2) + c_m^{-2} N_0^2(z) W_m = 0 \quad (2)$$

$$W_m(0) = W_m(-H) = 0, \quad (3)$$

где,  $N_0$  - частота плавучести,  $H$  - глубина моря,  $c_m$  - скорость внутренней волны.

Функции из набора  $\{\zeta_m\}$ , задающие горизонтальную структуру фиксированной моды ВВ, представляют решение уравнения Римана

$$(\partial \zeta_m / \partial x) - (3/2 c_m H) s_m \zeta_m (\partial \zeta_m / \partial \tau) = 0. \quad (4)$$

Здесь  $s_m = H \left[ \int_{-H}^0 (dW_m/dz)^2 dz \right] / \left[ \int_{-H}^0 (dW_m/dz)^2 dz \right]$  - безразмерный параметр, характеризующий квадратичную нелинейность мелкого моря,  $x = \varepsilon \hat{x}$ ,  $\tau = t - x/c$ .

Анализ решения уравнения (4) показывает, что нелинейные искажения ВВ носят накапливающийся характер и по этой причине даже при малых значениях отношения амплитуды ВВ к глубине ( $\zeta_0/H$ ) на входе в мелкое море эти искажения на определенном расстоянии, пройденном ВВ, начинают оказывать заметное влияние на горизонтальную структуру волнового поля. При этом характерный масштаб эволюции ВВ прямо пропорционален параметру нелинейности и обратно пропорционален её скорости распространения. В свою очередь указанные параметры определяются распределением частоты плавучести по глубине.

В параграфе 1.2 рассматривается эволюция нелинейных ВВ во вращающемся мелком море с меридиональной твердой стенкой. Используя асимптотический метод многих временных масштабов [26], основанный на предположении о малости внутреннего числа Россби  $\varepsilon \sim (\zeta_0/H)$ , удаётся представить начальное возмущение в виде суперпозиции геострофической, «медленной» компоненты движения и «быстрой», волновой компоненты. Показано, что «медленная» компонента движения на масштабе  $(\varepsilon f)^{-1}$  остаётся близкой к геострофическому равновесию, и быстрая компонента на неё не влияет, по крайней мере, на временах  $t \leq (\varepsilon f)^{-1}$ . Быстрая компонента представляет ВВ, сосредоточенную в окрестности границы, т.е. внутреннюю волну Кельвина (ВВК). Показано, что поле нелинейных ВВК характеризуется как зональной компонентой, детерминированной уравнением Римана, так и отличной от нуля вынужденной меридиональной составляющей скорости.

В параграфе 1.3 рассматривается влияние параметров стратификации, турбулентной вязкости (горизонтальной и вертикальной) и неоднородностей рельефа дна на динамику внутренних волн в мелком море. Для достаточно общего вида зависимости частоты плавучести от глубины, заданной трёхпараметрическим семейством кривых, получены аналитические выражения для различных параметров ВВ, в частности, параметра квадратичной нелинейности мелкого моря. Проанализировано влияние на этот параметр номера моды и эффективности нелинейного самовоздействия при изменении расположения максимума частоты плавучести по глубине и уменьшении толщины (мощности) волновода.

Получены аналитические выражения для времени диссипации ВВ в мелком море с постоянным коэффициентом  $\nu_1$  вертикальной турбулентной вязкости в зави-

симости от параметров модельного профиля частоты плавучести  $N_0(z)$ . Установлено, что время диссипации пропорционально квадрату глубины  $H^2$  и обратно пропорционально произведению квадрата вертикального волнового числа  $\gamma_m^2$  фиксированной моды на коэффициент  $\chi_m$ , зависящий от распределения частоты плавучести по глубине. Получены аналитические выражения для времени диссипации ВВ в мелком море с постоянным коэффициентом  $\nu_h$  горизонтальной турбулентной вязкости. Установлено, что при изменении параметров частоты плавучести мелкого моря время диссипации может измениться на порядок.

Во второй главе рассмотрены методы описания и соответствующие методы интерпретации результатов измерений случайных нелинейных ВВ в мелком море. В начале представлено статистическое описание линейных ВВ. С его помощью дан анализ их вертикальной структуры. Далее получено кинетическое уравнение для ВВ конечной амплитуды и на его основе проанализирован квазистационарный спектр этого волнения.

В параграфе 2.1, имеющем вспомогательный характер, дан анализ изотропного поля линейных внутренних волн. С его помощью показано, что статистическая структура этого поля, характеризуемая набором спектров  $E_m(k)$ , отвечающих фиксированной моде ВВ, полностью определяется значениями волнового поля на одной вертикали при известном решении краевой задачи (2), (3) т.е. статистические свойства ВВ сконцентрированы в его спектре  $E_m(k)$ . Обсуждается предложенная Гарретом и Манком [20, 21] феноменологическая модель спектра ВВ. Выделены следующие особенности, присущие данной модели: спектр задаётся на непрерывном континууме волновых чисел и спектральная кривая имеет наклон  $p = 2$ .

Для исследования вертикальной структуры ВВ использован корреляционный анализ случайного поля консервативного параметра  $q$ , фоновый градиент которого удовлетворяет соотношению  $dq_0/dz \approx C \cdot N_0(z)$ . Показано, что эмпирические ортогональные функции (ЭОФ) -  $\varphi_i(z)$  вариаций этого параметра в поле ВВ взаимозаменяемы с амплитудными функциями  $W_i(z)$  нормальных мод ВВ. Установлено, что в общем случае ЭОФ корреляционной матрицы параметра  $h = q(z, t) - q_0(z)$  связаны с амплитудными функциями нормальных мод  $W_i(z)$  интегральным соотношением

$$\mu_i \varphi_i(z_1) = \sum_j^{N_j} \int_0^H \left[ \int_0^H \psi_j(z_2, \omega) \varphi_i(z_2) dz_2 \right] \psi_n(z_1, \omega) G_j(\omega) d\omega, \quad (5)$$

где  $\psi_n(z, \omega) = N_0(z) W_n(z, \omega)$ ,  $G_m(\omega) = 2\pi k_m(\omega) (dk_m/d\omega) E_m[k_m(\omega)] \omega^{-2}$ .

В параграфе 2.2 дан вывод кинетических уравнений нелинейных случайных внутренних волн (СВВ) мелкого моря и проанализированы их простейшие решения. С использованием теории случайных волн [4, 5] получены замкнутые кинетические уравнения для одно и двучечной функций плотности вероятности (ФПВ) нелинейных СВВ. Найдено решение уравнения для одноточечной ФПВ. Показано, что искомая ФПВ для статистически однородного поля СВВ в процессе эволюции остаётся неизменной, другими словами, нелинейное самовоздействие волнового поля не сказывается на форме одноточечной плотности вероятности. Таким образом, будучи в начальный момент гауссовой, одноточечная ФПФ остаётся таковой и в последующие моменты времени. Иная ситуация складывается, когда поле СВВ в начальный момент времени состоит из смеси детерминированной составляющей и статистически однородного гауссова шума с заданной дисперсией. В этом случае в процессе эволюции ФПВ трансформируется, всё более отклоняясь от гауссовой [2].

Анализ решения кинетического уравнения для двучечной ФПВ показывает, что в отличие от одноточечной она существенно изменяется в процессе эволюции. Причина этих изменений заключается в расширении спектра СВВ в процессе эволюции волнового поля. Используя кинетическое уравнение для двучечной ФПВ, выведено уравнение для Фурье-образа по пространственной координате характеристической функции, соответствующей ФПВ. Найдено его решение, с помощью которого получено выражение для спектра (временного и пространственного) нелинейных СВВ в мелком море.

В параграфе 2.3 исследована трансформация модельного спектра СВВ в неоднородном по глубине мелком море. Используя асимптотическую процедуру [12], установлено, что в случае плавного изменения глубины, т.е.  $H = H(\mu x)$ , где  $\mu = H/L \ll 1$ ,  $L$ - её характерный горизонтальный масштаб изменения, поле вертикальных смещений  $\zeta$  нелинейных ВВ из частотного диапазона  $f \ll \omega \ll N$ . фиксированной моды удовлетворяет обобщённому уравнению Римана

$$\partial \zeta / \partial x - \alpha c^{-2} \zeta \partial \zeta / \partial \tau - q^{-1} (dq/dx) \zeta = 0, \quad (6)$$

где  $\alpha = (3/2)(c/H) s$ ,  $\tau = t - \int_0^x ds/c(s)$ ,  $x' = \epsilon x$ ,  $q = \sqrt{(c_0 Q_0)/(cQ)}$ ,  $Q(x) = \int_{-H(x)}^0 N^2 W^2 dz$ ,

индексом «0» отмечены параметры, рассчитанные на входе в мелкое море. С помощью замены  $\eta = \zeta/q$  и  $X = \int_0^x q ds/c^2$  [8] уравнение (6) вновь приводится к стандартной форме уравнения Римана, следовательно, спектр СВВ в мелком море с плавными шеховатостями дна сохраняет универсальный вид.

Третья глава посвящена вопросам параметрической неустойчивости и взаимодействия нелинейных внутренних волн в мелком море. В задачах динамики ВВ в прибрежной зоне океанов эти вопросы занимают одно из центральных мест. К их числу следует отнести: (а) вопрос о параметрическом возбуждении ограниченного числа нормальных мод ВВ; (б) вопрос о влиянии синоптического узкополосного шума на ВВ с приливной частотой; (в) вопрос о взаимодействии ВВ с приливной или инерционной частотой с полем высокочастотных ВВ.

В параграфе 3.1 рассматривается параметрическая неустойчивость [11] ВВ в мелком море. Показано, что амплитудная функция поля вертикальной скорости ВВ  $w(\bar{r}, z, t) = A(t)W(z) \exp\{i(\bar{\kappa} \cdot \bar{r})\}$  удовлетворяет уравнению, которое при  $N^2(z, t) = N_0^2(z) + N_*^2(z) \cos(\omega t)$  имеет вид  $d^2 A/d\tau^2 + (a - 2b \cos \tau)A = 0$ , где  $\tau = 2t/\omega$ ,  $a = 4\omega_*^2 (\bar{N}_0^2 + \sigma_m^2 f^2)/(1 + \sigma_m^2)$ ,  $b = -2(\bar{N}_0^2/\omega_*^2)/(1 + \sigma_m^2)$ ,  $\sigma_m = m\pi/(\kappa H)$ .

Из теории параметрического резонанса известно [13], что скорость роста при  $|b| \ll 1$  пропорциональна  $|b|$ . Воспользовавшись условием параметрического резонанса  $a = n^2$  (где  $n = 1, 2, \dots$ ) при  $\lambda \gg H$ , получим для фиксированной моды дисперсионное соотношение

$$\omega_* \sqrt{a_n} / 2 = \sqrt{[\bar{N}_0^2 + (m\pi/\kappa H)^2 f^2] / [1 + (m\pi/\kappa H)^2]} = \omega_n(\kappa), \quad (7)$$

т.е. собственные частоты  $\omega_n$ , возбуждаемых ВВ фиксированной моды  $m$  при заданной частоте плавучести  $\bar{N}_0$  могут быть выражены через частоту возбуждающей силы  $\omega_*$ . Если  $-2b/a = \bar{N}_*^2/\bar{N}_0^2 \ll 1$ ,  $a_n = n^2$ , тогда  $T_n = 2/n$  (сут).

Из выражения (7) следует, что  $\eta$  и  $a$  связаны соотношением  $\eta \approx -2b/a = -\bar{N}_*^2/\bar{N}_0^2$ , а т.к.  $\eta > 0$ , то отсюда следует ограничение на возможность возбуждения  $n$ -й гармоники в зависимости от широты места  $\varphi$ . Для оценки длин ВВ первых нескольких гармоник получим  $\lambda_n = (4H/n)(\bar{N}_0/\omega_*) [a_n - 4(\omega/\omega_*)^2 \sin^2 \varphi]^{1/2}$ .

Таким образом, в мелком море под действием параметрической неустойчивости, вызываемой поверхностным приливом, возможен рост амплитуд ВВ с частотами, близкими к частотам его гармоник. При этом длины ВВ с частотами неустойчивых гармоник зависят от широты места генерации  $\varphi$ , средней частоты плавучести  $\bar{N}_0$  и от глубины мелкого моря.

В параграфе 3.2. дан анализ параметрической неустойчивости ВВ в мелком море с диссипацией. Зависимость числа возбуждаемых мод от порогового значения вариаций частоты плавучести составляет содержание этого параграфа. Анализ параметрической неустойчивости в присутствии вязкости показал, что основная зона параметрической неустойчивости определяется неравенством

$$-\sqrt{(\eta\omega/4)^2 - (\mu k_m^2)} < \omega - \omega_c/2 < \sqrt{(\eta\omega/4)^2 - (\mu k_m^2)}.$$

Здесь  $\mu$ -коэффициент трения,  $k_m$ -вертикальное волновое число. Отсюда следует, что рост амплитуды моды ВВ с номером  $m$  возможен начиная с порогового значения  $\bar{N}_* = N_c$ , а при фиксированном значении амплитуды приливных колебаний уровня моря возможно возбуждение лишь конечного числа мод. Для полусуточных ВВ  $\omega \approx \omega_c$  при фиксированном значении параметра  $\eta_c$  число возбуждаемых мод  $M$  определяется формулой

$$M(\omega_*) = (\eta_c/\sqrt{\mu})(5\omega_* H^2/24\pi)^{1/2} \cos^2 \varphi.$$

Оценки показывают, что в прибрежной зоне океана со средним значением эффективного коэффициента турбулентной вязкости  $\mu = 0.05$  (см/с) возможно возбуждение нескольких первых мод полусуточной ВВ при достижении значений параметра  $\eta$  из интервала  $\eta \in (0.1 - 0.05)$ . Механизмом генерации таких ВВ может выступать параметрическая неустойчивость, порождаемая приливными колебаниями уровня. Показано, что наличие диссипативных процессов в шельфовой зоне может оказаться принципиальным как для самого явления параметрической неустойчивости, так и для возбуждения конечного числа нормальных мод ВВ.

В параграфе 3.3 решена задача о взаимодействии узкополосного низкочастотного (НЧ) шума с регулярной гармонической ВВ. В соответствии с поставленной задачей на границе мелкого моря волновое поле задавалось в виде  $\phi(t, x=0) = u_0 \sin(\omega_0 t) + \psi(t)$ , где  $\psi$  - нормальный случайный процесс с  $\langle \psi \rangle = 0$ , дисперсией  $\sigma^2$  и коэффициентом корреляции  $R(\tau) = (1 - 2\Omega^2 \tau^2) \exp(-\Omega^2 \tau^2)$ , здесь  $\Omega$  - ширина спектра НЧ. Установлено, что форма спектральных составляющих, возникающих из-за взаимодействия НЧ-шума с ВВ, существенно зависит от величины шумовой модуляции  $M = \sigma \gamma \omega_0 x$ . При  $Mn \ll 1$ , где  $n$  - номер гармоники, спектр имеет вид

$$Sp_n(\omega; x) \approx S_{*n}(\omega - n\omega_0) \cdot (d/2)^{2l} (l!)^{-2} (1 + l(\omega - n\omega_0)/\omega_0). \quad (8)$$

Здесь  $S_{*n}(\omega)$  - спектр НЧ-шума,  $d = x/(u_0 \omega_0 \gamma)$ ,  $\gamma = (3/2)(s/cH)$ ,  $l$  - номер гармоники НЧ шума. Таким образом, при  $nM < 1$  в спектре ВВ появляется асимметричный пестал, повторяющий форму спектра НЧ шума, с максимумами в окрестности суммарной и разностной частот между частотами волны и НЧ шума.

При  $nM \gg 1$  спектр  $n$ -й гармоники ВВ определяется выражением

$$Sp_n(\omega; x) = \frac{J_n^2(\omega d / \omega_0)}{\omega^3 \gamma^3 x^3 \sigma \Omega \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\omega - n\omega_0)^2}{2\sigma^2 \omega^2 \gamma^2 x^2 \Omega^2}\right]. \quad (9)$$

Из (9) следует, что процесс трансформации спектра существенно зависит от величины шумовой модуляции  $M = \sigma \gamma \omega_0 x$  и при  $\omega \rightarrow \infty$  спектр ВВ имеет универсальную асимптотику  $Sp_n \sim \omega^{-3}$ .

В параграфе 3.4 решена задача о трансформации спектра высокочастотных ВВ при их взаимодействии с нелинейным регулярным внутренним приливом. При её решении ВВ на границе мелкого моря задавалась в виде  $\zeta_0(t) = A \cos(\Omega t + \psi) + \xi_0(t)$ , т.е. состояла из ВВ с приливной частотой  $\Omega$  (далее просто прилив) со случайной фазой  $\psi$ , равномерно распределённой на интервале  $[-\pi, +\pi]$ , и случайной ВВ  $\xi_0(t)$  с частотой  $\omega \gg \Omega$  и дисперсией  $\sigma^2 = \langle \xi_0^2 \rangle$ . Для характеристики степени нелинейности прилива и ВВ введены безразмерные параметры:  $d_B = \beta \sigma \omega x$ ,  $d_n = \beta A \Omega x$ ,  $n$ , и  $n, \Omega$  - эффективное число гармоник прилива и ширина его спектра при  $x > 0$ ,  $\beta = (3/2)(s/cH)$ . Полагалось, что прилив находится достаточно далеко от места обрушения и  $n, \Omega \ll \omega$ . Эффективность влияния ВВ на прилив определялась с помощью параметра

$d_{пв} = d_b(n_s \Omega / \omega_s) \ll 1$ . В этом случае (при  $d_b \ll 1$ ) для поля ВВ получается выражение  $\xi(t, x) = \xi_0(t + \beta A x \cos(\Omega t + \psi)) / [1 + \beta A \Omega x \sin(\Omega t + \psi)]$  Из него следует, что в результате взаимодействия с приливом спектр ВВ приобретает вид  $S p_{\xi}(\omega, x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\omega \beta A x) S_0(\omega - n \Omega)$ , где  $S_0(\omega)$  - спектр ВВ на входе мелкого моря.

Анализ этого выражения показывает, что при  $d_{пв} \gg 1$  в области  $\omega \in [\omega'_s = \omega_b / (1 + d_{пв}), \omega'_s = \omega_b / (1 - d_{пв})]$  спектр имеет вид  $S p_{\xi}(\omega, x) \sim \sigma^2 (\pi \omega \beta A x \Omega)^{-1}$ , т.е.  $\sim \omega^{-1}$ .

Четвёртая глава посвящена анализу внутреннего волнения в двух районах Тихого океана: в прибрежной зоне Японского моря в 1986-2004 годах и на мексиканском шельфе в 1995 г.

В параграфе 4.1 рассматриваются особенности ВВ в прибрежной зоне Японского моря. В сентябре 1999 г в точке с координатами 42°34' с.ш., 131°09' в.д. (рис. 1) была установлена автономная буйковая станция с интегральными измерителями "ПОТОК". В конце эксперимента рядом с ней было выполнено 25 зондирований с частотой 1(час<sup>-1</sup>) зондом CTD GUILDLINE с измерениями гидростатического давления, температуры и электропроводности.

Анализ изменчивости гидрологических параметров проводился спектральным методом по единой методике с помощью алгоритмов, изложенных в монографиях [3, 18] так, чтобы число степеней свободы составляло не менее 20, что обеспечивало приемлемую достоверность результатов анализа [3, 18].

На рис.2 (а), (б) представлены нормированные спектральные плотности (далее спектры) вариаций температуры и модуля скорости потока. Над спектральными мак-

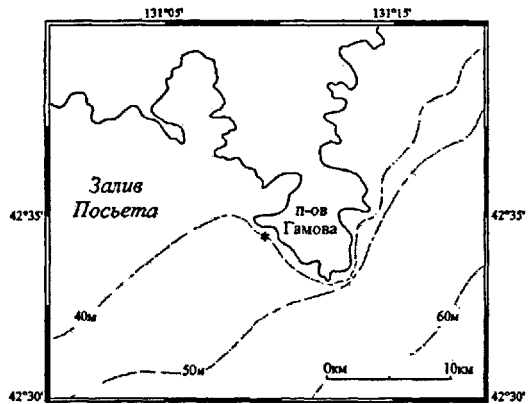


Рис. 1. Схема расположения автономной буйковой станции (\*) в районе эксперимента 1999 г.

симумами указаны в часах соответствующие им значения периодов колебаний. Обращает на себя внимание, во-первых, квазилинейчатая структура спектров, во-вторых,

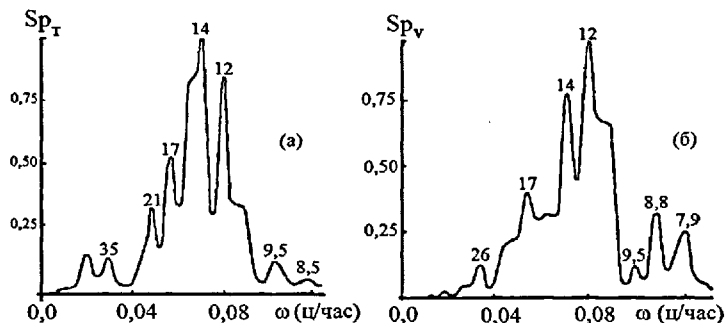


Рис.2. Нормированные на максимальные значения спектры вариаций: (а) – температуры, (б) – модуля скорости течения

их значительное сходство. Вместе с тем, имеются и различия между ними. В спектре вариаций температуры отсутствуют максимумы на периодах 26 и 8,8 час.

Для интерпретации особенностей представленных спектров использовалось соотношение Доплера, согласно которому волновая мода с номером  $m$  и частотой  $\omega$ , распространяясь в однородном потоке, скорость которого  $U_0$ , вызывает колебания гидрологических параметров с частотой  $\omega_m = \omega (1 \pm U_0/c_m)$ . С помощью среднесуточного профиля  $N(z)$  рассчитывались модифицированные фоновым потоком периоды колебаний изотерм, вызванных фиксированными модами внутренней волны Кельвина (ВВК). Установлено, что рассчитанные периоды хорошо согласуются с периодами максимумов в спектрах, представленных на рис.2(а), (б). Хорошее соответствие между расчётными и экспериментальными значениями периодов позволяет утверждать, что вдоль границы полуострова Гамова действительно распространяется многомодовая ВВК.

На рис. 3 представлена гидрологическая трасса, состоящая из двух АБС, установленных в точках Pt\_1 ( $\lambda = 131^{\circ}08'$ ,  $\varphi = 42^{\circ}34.9'$ ) и Pt\_2 ( $\lambda = 131^{\circ}11'$ ,  $\varphi = 42^{\circ}33'$ ) осенью 2004 г. для исследования ВВ. АБС были снабжены термографами с точностью  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$  и инерционностью  $0,02^{\circ}\text{C}/\text{сек}$ . В ходе эксперимента в точке  $\lambda = 131^{\circ}09'$ ,

$\varphi = 42^{\circ}33.2'$  (D\_ly) была организована суточная станция, на которой с частотой  $1(\text{час}^{-1})$  зондом CTD GUIDLINE были выполнены 25 зондирований.

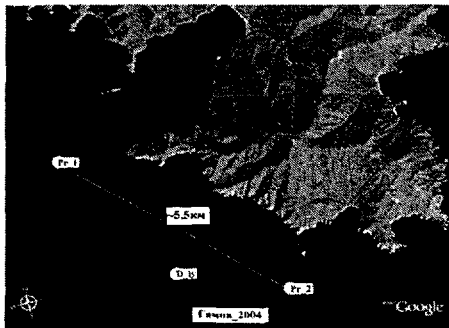


Рис. 3. Схема гидрологической трассы 2004 г.

На рис.4 представлены фрагменты записей температуры в точках Pr\_1, 2, сглаженные временным окном Тьюки шириной 1 час.

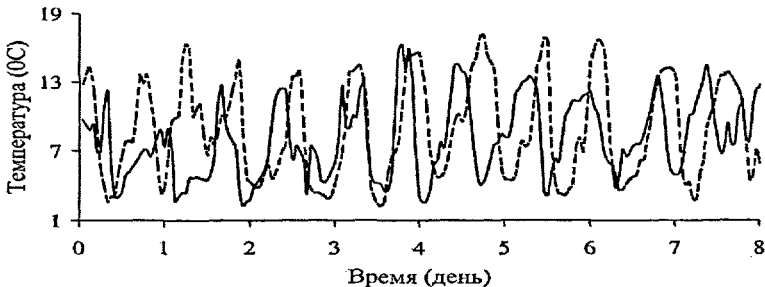


Рис.4. Температура на горизонтах  $z=28\text{м}$  (пунктирная л.) и  $z=35\text{м}$  (сплошная л.) в прибрежной зоне п-ва Гамова. Начало записи приходится на 12. 09. 2004 г.

Сплошной и пунктирной линиям отвечает температура, зарегистрированная в точках Pr\_2 и Pr\_1 соответственно. Обращает на себя внимание устойчивый положительный сдвиг фаз между наступлением «тёплой воды» в точках Pr\_2, Pr\_1. Расчёты показывают, что сдвиг фаз составляет  $-(4,1 \pm 0,4)$  час. Отсюда для скорости распространения возмущений вдоль трассы получим  $\langle c \rangle \approx 0,38 \pm 0,04(\text{м/с})$ . Используя среднесуточный профиль частоты плавучести, полученный 20.09.04 г. в точке «D\_ly», была рас-

считана скорость распространения низкочастотных ( $\sim 1/18$  час<sup>-1</sup>) ВВК, которая составила  $c \sim 0,44$  (м/с). Полученное значение неплохо согласуется с экспериментальной оценкой скорости распространения возмущений температуры.

По результатам натуральных наблюдений сделаны следующие выводы: (а) в районе эксперимента спектральный состав колебаний вдольбереговой компоненты скорости и температуры определяется волнами двух типов: ВВ, приходящими со стороны моря и ВВК, распространяющимися вдоль берега; (б) волновое поле в прибрежной зоне полуострова Гамова имеет полигармоническую ( $> 2$  гармоник) и многомодовую ( $\geq 2$  мод) структуру.

В параграфе 4.2 на основе натуральных данных, полученных осенью 1986 г., проведено сопоставление модифицированных амплитудных функций нормальных мод ВВ  $-W_m(z)$  и эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) вариаций температуры  $\varphi_m(z)$ , и получено относительное распределение энергии ВВ по модам.

На рис. 5 представлены три ЭОФ  $\varphi_m(z)$  корреляционной матрицы параметра  $h(z,t) = \delta T / \sqrt{dT_0/dz}$  с условием нормировки  $|\varphi_m|_{\max} = 1, m = 1, 2, 3$ , и модифицированные амплитудные функции ВВ  $\psi_m(z) = W_m \cdot dT_0/dz$ , нормированные как и ЭОФ.

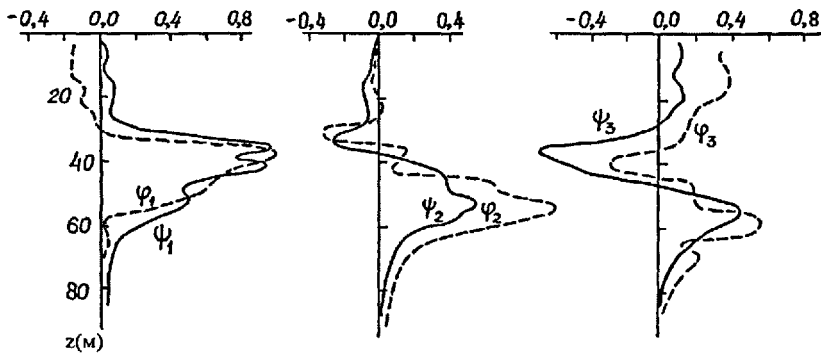


Рис.5. ЭОФ ( $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ ) вертикальных вариаций температуры и модифицированные амплитудные функции ( $\psi_1, \psi_2, \psi_3$ ) первых трёх мод ВВ

Из рисунка следует, что соотношение  $\varphi_m(z) \approx W_m(z) \cdot (dT_0/dz)$  неплохо подтверждается экспериментально.

Неплохое соответствие между двумя наборами функций позволяет провести сравнение коэффициентов разложения корреляционной функции  $\Gamma_{hh}$  по ЭОФ и коэффициентов, характеризующих значения энергии, приходящейся на каждую моду ВВ. Тем самым открывается возможность для оценки распределения энергии по модам ВВ. Используя модельный спектр ВВ, предложенный Гареттом и Манком [20,21], для коэффициентов разложения корреляционной функции  $\Gamma_{hh}$  флуктуаций температуры по ЭОФ с учетом равенства  $\Gamma_{hh} = B_{hh}$  получим

$$\mu = \nu_n = H(n) \int_f^{N_{\max}} d\omega 2B(\omega) E_0 k_n(\omega) dk_n / d\omega.$$

В таблице 1 приведены оценки относительных значений коэффициентов разложения  $B_{hh}$ , по  $\varphi_m(z)$   $\varepsilon_n = \mu_n / \sum_{m=1}^M \mu_m$

и оценки тех же коэффициентов разложения по  $W_m(z)$ , рассчитанных с помощью модели спектра ГМ79

$\delta = \nu_n / \sum_{m=1}^{20} \nu_m$ . Из таблицы следует, что разложение вертикальных профилей вариации температуры по ЭОФ может быть представлено всего тремя ЭОФ, причем в разложении будет преобладать первая ЭОФ ( $\varepsilon_1 > 60\%$ ). Иное распределение по вкладам каждой из мод даёт модель спектра ГМ79. В этом разложении вклад первой моды будет составлять лишь 30%

**Таблица 1.**

$n$	$\varepsilon_n$	$\delta_n$
<b>1</b>	<b>0.61</b>	<b>0.31</b>
<b>2</b>	<b>0.21</b>	<b>0.24</b>
<b>3</b>	<b>0.11</b>	<b>0.17</b>

В параграфе 4.3 представлены результаты исследования нелинейных свойств ВВ в прибрежной зоне Японского моря по натурным данным, полученным в 1999, 2003 годах.

На рис.6 представлен нормированный на дисперсию спектр вариаций температуры прибрежных вод у полуострова Гамова осенью 1999 г. Над спектральными максимумами указаны значения соответствующих им периодов в часах. Обращают на себя внимание максимумы на периодах ~11.3, 12.6 и 14.6 (час) и максимум в окрестности первой гармоники полусуточной частоты. Несложно заметить, что разностные частоты между несущей и боковыми частотами, на которые приходится максимумы, одного порядка, а их среднее значение составляет ~1/4 (ц/сут).

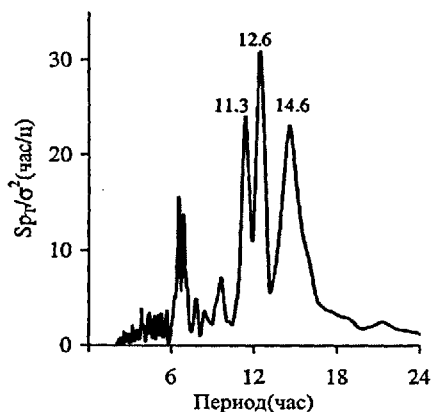


Рис. 6. Спектр вариаций температуры 1999 г.

же структуру, как и в случае с температурой. Здесь тоже имеется три максимума (на периодах 11.1, 12.5 и 14.6(час)) и максимум, отвечающий первой гармонике полусуточной частоты. Среднее значение разностных частот в этом случае составляет ту же величину ~ 1/4(ц/сут). Примечательно, что максимум, отвечающий первой гармонике приливной частоты ~1/6.1(ц/час), тоже окружён боковыми максимумами на частотах: ~1/6.6 и 1/5.7 (ц/час). Более того среднее значение разностных частот

вновь составляет ~0.28(ц/сут), т.е. по порядку совпадает с частотой низкочастотной составляющей изменчивости ~1/4(ц/сут).

На рис. 7. представлен спектр вариаций квадрата скорости течения на горизонте  $z=35$ м, который имеет ту

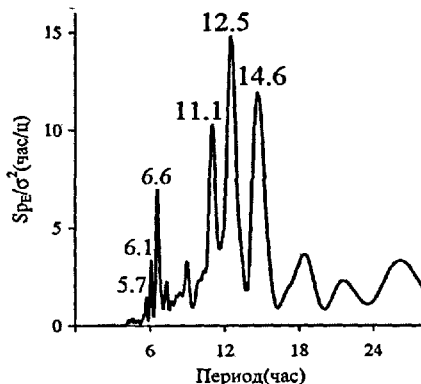


Рис. 7. Спектр вариаций квадрата скорости осенью 1999 г.

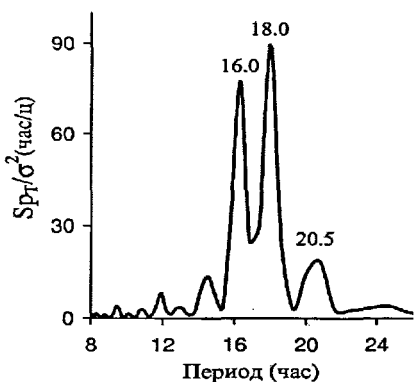


Рис. 8. Спектр вариаций температуры осенью 2003 г

одного порядка, а их среднее значение составляет величину  $\sim 1/7$  (ц/сут).

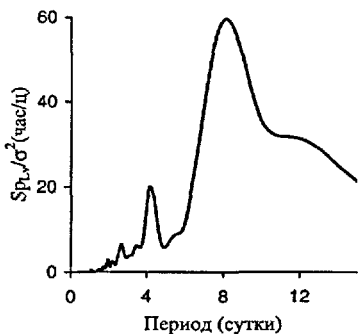


Рис.9. Спектр колебаний уровня Японского моря в заливе Посьета осенью 1999 г.

$1/8$  и  $1/4$  (ц/сут). Эти результаты согласуются с выводами работы [1], в которой показано, что у западного побережья Японского моря под действием барической волны, образованной движущимися циклонами, возможно возбуждение вынужденных шельфовых волн с периодами 4-5, 7-10 суток.

Осенью 2003 г для наблюдения за ВВ в точке с координатами  $\lambda = 131^{\circ}08.4'$ ,  $\varphi = 42^{\circ}34.9'$  была оборудована АБС с термографом «ПИРАТ-01», выставленным на горизонте  $z=28$ м, который фиксировал температуру на протяжении  $\sim 8$  суток. Нормированный спектр её вариаций представлен на рис. 8. Из него следует, что большая часть энергии вариаций сосредоточена в достаточно узкой окрестности частот  $1/18$  и  $1/16$  (ц/час). Примечательно, что разностные частоты между главной и боковыми частотами, на которые приходится максимумы,

представляется важным подтвердить наличие низкочастотной изменчивости на периодах 3-4(сут) и 7-8(сут) на более продолжительных рядах наблюдений гидрологических параметров. С этой целью в работе использован ряд значений уровня моря в заливе Посьета с июля по ноябрь 1999 г с интервалом дискретизации 7,5 мин. На рис.9 приведен спектр колебаний уровня в синоптическом диапазоне частот с числом степеней свободы  $\sim 60$ . Из рисунка следует, что спектр узкополосен, имеет два выраженных пика на частотах

Таким образом, исследования ВВ в прибрежной зоне Японского моря осенью 1999, 2003 годов показали, что (1) спектры изменчивости температуры и кинетической энергии в окрестности полусуточной и инерционной частот имеют характерную триплетную структуру; (2) разностные частоты между опорной полусуточной или инерционной частотой и боковыми частотами по порядку величины близки к частоте синоптической изменчивости исследуемых параметров. Выявленные особенности находят естественное объяснение, если воспользоваться моделью мелкого моря с вращением, ограниченного горизонтальной твёрдой стенкой и охваченного нелинейным внутренним волнением Кельвина.

В параграфе 4.4 обсуждаются спектральные свойства ВВ среднего и высокочастотного диапазонов в двух районах прибрежной зоны Тихого океана, и даётся их сравнение с подобными свойствами нелинейных случайных ВВ мелкого моря.

На рис. 10 представлен спектр изменчивости температуры на горизонте  $z=35\text{м}$  в

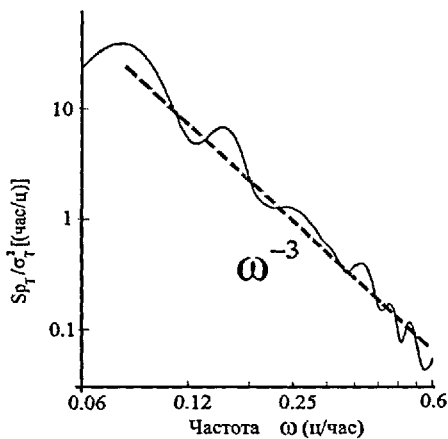


Рис. 10. Спектр вариаций температуры 1999 года.

мезомасштабном диапазоне с числом степеней свободы равным 120, полученный в эксперименте 1999 г в Японском море. У спектра выделяется характерный наклон с ростом частоты. Здесь же прямой линией показана зависимость  $Sp_T \sim \omega^{-3}$ . Обращает на себя внимание хорошее соответствие между указанной прямой и характером спадания спектра. Осенью 2003 г исследования ВВ было продолжено. Вновь было обнаружено хорошее соответствие между зависимостью  $Sp_T \sim \omega^{-3}$  и характером спа-

дания спектра. Главный итог исследований изменчивости температуры в прибрежной зоне Японского моря осенью 1999, 2003 годов состоит в том, что наклон спектра её изменчивости в среднем диапазоне частот близок к  $p=3$ .

Другой район проведения экспериментальных исследований спектральных свойств внутреннего волнения был расположен на шельфе Тихого океана (рис. 11).

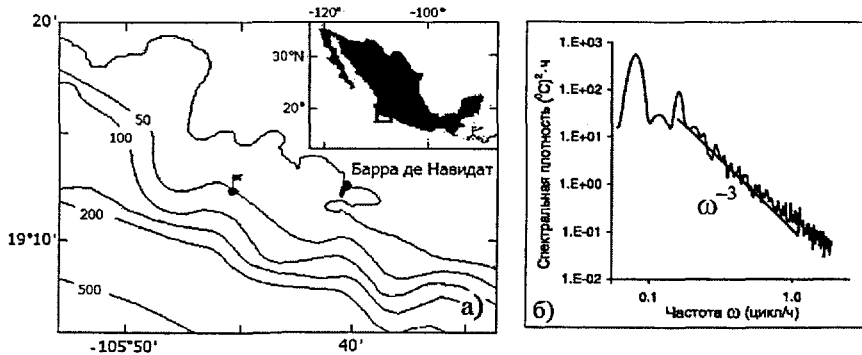


Рис.11. Схема расположения притопленной буйковой станции (ПБС) (флаг) в районе эксперимента (а); спектр вариаций температуры, зарегистрированный ПБС. Прямой линией показана зависимость  $S_{p_T} \sim \omega^{-3}$  (б).

Здесь, на горизонте  $z=38$  м осенью 1995 г был установлен автономный измеритель температуры и солёности (SBE-16), который отработал около 30 суток. На рис. 11б показан спектр изменчивости полученного ряда температуры с числом степеней свободы 120. Здесь же прямой линией показана зависимость  $S_{p_T} \sim \omega^{-3}$ . Как и ранее, имеется частотный диапазон, в котором наблюдается хорошее соответствие между характером спада спектра и степенной зависимостью  $S_{p_T} \sim \omega^{-3}$ . Заметим, что подобное поведение спектра вариаций температуры с ростом частоты было зафиксировано и в ряде других районов прибрежной зоны Мирового океана [19, 27, 28].

При анализе взаимодействия высокочастотных ВВ с внутренним приливом было показано, что спектр ВВ принимает универсальный степенной вид  $S_{p_T} \sim T$ , т.е.  $\sim \omega^{-1}$ , где  $T$ -период ВВ. На основе данных, полученных осенью 1995г на мексиканском шельфе, было выполнено сравнение наклонов натурного и модельного спектров вариаций температуры. Для анализа выбирались фрагменты с максимальной и с минимальной амплитудами приливной изменчивости.

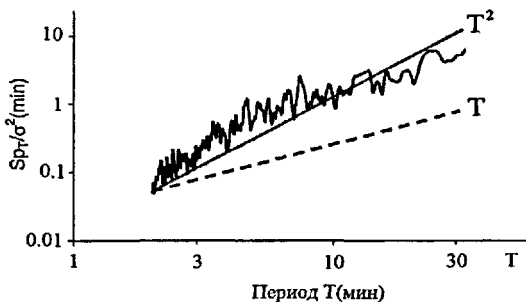


Рис.12. Спектр высокочастотных вариаций температуры, соответствующий минимальным амплитудам её приливной изменчивости

следует, что в указанном диапазоне частот с увеличением периода спектр растёт  $\sim T^2$ , т.е. его наклон близок к стандартному  $p = 2$ .

На рис. 13 представлен спектр с 70 степенями свободы для фрагментов с максимальной амплитудой приливной изменчивости. Как и ранее, прямым линиям отвечает линейная (непрерывная линия) и квадратичная (прерывистая линия) зависимости спектра от периода. Из рисунка следует, что с увеличением периода спектр растёт  $\sim T$ , т.е.  $\sim \omega^{-1}$ , его наклон близок к  $p = 1$ . Таким образом, с учётом линейной связи между вариациями температуры  $\delta T$  и амплитудой гармонической волны  $\zeta$  на основании изложенного можно сделать следующий вывод: на интервалах времени с минимальными амплитудами внутреннего прилива наклон спектра близок к  $p = 2$ , а на интервалах времени с максимальными амплитудами внутреннего прилива он близок к  $p = 1$ , т.е. совпадает с наклоном, предсказанным теорией взаимодействия нелинейного внутреннего прилива с высокочастотным внутренним волнением.

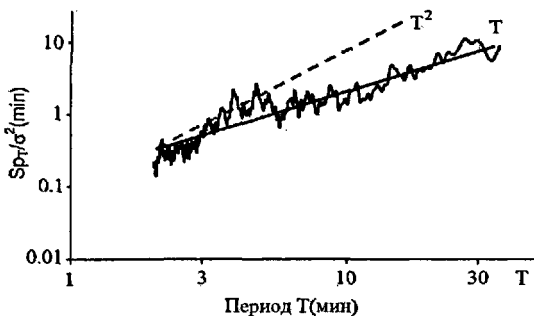


Рис.13. Спектр высокочастотных вариаций температуры, соответствующий максимальным амплитудам её приливной изменчивости

На рис. 12 представлен спектр вариаций температуры с 70 степенями свободы на фрагментах, соответствующих минимальным амплитудам приливной изменчивости. Прямым линиям отвечает линейная (прерывистая линия) и квадратичная (сплошная линия) зависимости спектра от периода. Из рис.12

следует, что с увеличением периода спектр растёт  $\sim T$ , т.е.  $\sim \omega^{-1}$ , его наклон близок к  $p = 1$ . Таким образом, с учётом линейной связи между вариациями температуры  $\delta T$  и амплитудой гармонической волны  $\zeta$  на основании изложенного можно сделать следующий вывод: на интервалах времени с минимальными амплитудами внутреннего прилива наклон спектра близок к  $p = 2$ , а на интервалах времени с максимальными амплитудами внутреннего прилива он близок к  $p = 1$ , т.е. совпадает с наклоном, предсказанным теорией взаимодействия нелинейного внутреннего прилива с высокочастотным внутренним волнением.

**В заключении** перечислены основные результаты работы

1. С использованием асимптотического метода многих временных масштабов показано, что начальное возмущение поля скорости конечной амплитуды, расположенное у боковой границы мелкого моря, в процессе эволюции разделяется на геострофическую компоненту движения и нелинейную внутреннюю волну Кельвина, эволюция которой определяется уравнением Бюргерса с коэффициентом нелинейности, зависящим от распределения частоты плавучести по глубине;

2. Впервые решён ряд задач о трансформации спектра нелинейных ВВ в мелком море с плавными неоднородностями рельефа дна:

- показано, что в результате самовоздействия у поля ВВ формируется неоднородный спектр интенсивности вертикальных смещений с универсальной асимптотикой вида  $Sp_z(x; \omega) \sim \omega^{-3}$ ;
- установлено, что в результате взаимодействия нелинейной ВВ с приливной частотой  $\omega_0$  и высокочастотных ВВ спектр последних принимает универсальный вид  $Sp_z(\omega, x) \sim \omega^{-1}(\sigma^2/\pi s A x \omega_0)$ , а его параметры определяются энергией волнения  $\sim \sigma^2$ , амплитудой  $A$  и частотой  $\omega_0$  прилива;
- показано, что взаимодействие нелинейной ВВ с приливной частотой  $\omega_0$  и синоптического шума существенно зависит от шумовой модуляции  $M = \sigma s \omega_0 x$  так, что в случае  $nM \gg 1$  при  $\omega \rightarrow \infty$  спектр ВВ спадает по универсальному закону  $S_z(x; \omega) \sim \omega^{-3}$ , а для противоположного случая  $nM \ll 1$  в спектре можно выделить две характерные области частот, в которых  $Sp_z(x; \omega) \sim \omega^{-3}$  и  $Sp_z(x; \omega) \sim \omega^{-2}$ .

3. Спектральный анализ измерений температуры, проведенных осенью 1999, 2003 годах в прибрежной зоне Японского моря и в 1995 г. на тихоокеанском шельфе Мексики показал, что степенная зависимость  $Sp_T \sim \omega^{-p}$  с наклоном  $p=3$  неплохо аппроксимирует спектр её вариаций в среднем диапазоне частот, а в высокочастотной области наклон спектра близок к  $p=1$ .

4. С использованием метода эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) показано, что в мелком море, охваченном нелинейными ВВ, модифицированные амплитудные функции нормальных мод  $N_0(z)W_m(z)$  взаимозаменяемы с соответствующими

ЭОФ  $\varphi_m$  корреляционной матрицы вариаций поля скалярного параметра  $q_0$ , фоновый градиент которого удовлетворяет соотношению  $dq_0/dz \approx CN_0$ . В ходе анализа натуральных наблюдений, выполненных на шельфе Японского моря осенью 1986 г установлено, что соотношение  $\varphi_m(z) = T'_0 W_m(z)$ , где  $T'_0 = (dT_0/dz)$  - фоновый градиент температуры, неплохо выполняется.

Выше изложенное позволяет заключить, что предложенная в работе модель нелинейного внутреннего волнения адекватно отражает целый ряд характерных особенностей волнового процесса и во многом определяющего мезомасштабную изменчивость гидрологических полей в прибрежной зоне Мирового океана.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Герман В.Х., Левиков С.П. Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 231 с.
2. Гурбатов С.Н., Малахов А.Н., Саичев А.И. Нелинейные случайные волны в средах без дисперсии. М.: Наука, 1990. 215 с.
3. Драган Я.П. Рожков В.А., Яворский И.И. Методы вероятностного анализа ритмики океанологических процессов. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 319 с.
4. Кляцкин В.И. Стохастические уравнения глазами физика. Основные положения, точные результаты и асимптотические приближения. М.: Физматлит, 2001. 250 с.
5. Кляцкин В.И. Динамика стохастических систем. Курс лекций М.: Физматлит, 2002. 180 с.
6. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. СПб, 1992. 272 с.
7. Ле Блон П., Майсек Л. М. Волны в океане. М.: Мир, 1981. Т. I, Т. II. 682 с.
8. Наугольных К.А., Островский Л.А. Нелинейные волновые процессы в акустике. М.: Наука, 1990. 236 с.
9. Островский Л.А. Нелинейные внутренние волны в океане // Нелинейные волны М.: Наука, 1979. С. 292-324.
10. Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование // под ред. В.И. Таланова и Е.Н. Пелиновского Н. Новгород, 1999. Т. 2. 340 с.
11. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М: Наука, 1984. 181с.
12. Рыскин Н.М., Трубецков Д.И. Нелинейные волны М.: Наука, 2000. 286 с.
13. Якубович В.А., Старжинский В.М. Параметрический резонанс в линейных системах. М.: Наука, 1987. 328 с.
14. Apel J.R., Gonzales F.I. Nonlinear features of internal waves of Bay California as observed from the SEASAT imaging radar // J. Geophys. Res. 1983. Vol. 88, No. 7, C7, P. 4459-4466.
15. Apel J.R. Badley M., Berson J. et al. An overview of the 1995 SWARM shallow water internal wa-ve acoustic scattering experiment // IEEE J. Oceanic Engineering. 1997. Vol. 22, No. 3. P. 465-500.
16. Brink K.H. Coastal-trapped waves and wind-driven currents over the continental shelf // Annu. Rev. Fluid Mech. 1991. Vol. 23. P. 389-412.
17. Brown, B. E. Coral bleaching: Causes and consequences // Coral Reefs. 1997. Vol. 16. P. 129-138.
18. Emery W.J. and Thomson R.E. Data Analysis Methods in Physical Oceanography. New York: Elsevier, 1997. 634 pp.

19. Filonov E. A., M.F. Lavin Internal tides in the Northern Gulf of California // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, NO, C5, 3151. P. 20-1-20-17.
20. Garret C.J.R., Munk W.H. Space-time scales of internal waves: A progress report // *J. Geophys. Res.* 1975. Vol. 80. P. 291-297.
21. Garret C.J.R., Munk W.H. Internal waves in the ocean // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1979. Vol. 11. P. 339-369.
22. Gill A.E., Clarke A.J. Wind-induced upwelling. Coastal currents and sea-level changes // *Deep-Sea Research.* 1974. Vol. 21. P. 325-345.
23. Helfrich K.R., W.K. Melville Long Nonlinear Internal Waves // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2006. Vol. 38. P. 395-425.
24. Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T., Barnes B. A nonlinear model of internal tide transformation on Australian North-West Shelf // *J. Phys. Ocean.* 1997. Vol. 27. P. 871-896.
25. Holloway P.E., Pelinovsky E., Talipova T. A generalized Korteweg-de Vries model of internal tide transformation in the coastal zone // *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104, NO. C8. P. 18, 333-18,350.
26. Reznik G.V., Grimshaw R. Nonlinear geostrophic adjustment in the presence of a boundary // *J. Fluid Mech.* 2002. Vol. 471. P. 257-283.
27. van Haren H., Maas L., van Aken H. On the nature of internal waves spectra near a continental slope // *Geophys. Res. Lett.* 2002. 29, 1615, doi: 10.1029/2001GL0143 41.
28. van Haren H., Some observations of nonlinearly modified internal wave spectra // *J. Geophys. Res.* 2004. 109, C03045, doi:10.1029/2003JC002136.
29. Vlasenko V., Hutter K. Numerical experiments on the breaking of solitary internal waves over a slope-shelf topography // *J. Phys. Ocean.* 2002. Vol. 32. P. 1779-1793.
30. Wolanski, E., Pickard G. L. // Upwelling by internal tides and Kelvin waves at the continental shelf break on the Great Barrier Reef. // *Aust. J. Mar. Res.* 1983. Vol. 34. P. 65-80.
31. Wolanski E., Hamner W. H. Topographically controlled fronts in the ocean and their biological influence // *Science.* 1988. Vol. 241. P. 177-181.
32. Wolanski, E., and B. Delesalle // Upwelling by internal waves, Tahiti, French Polynesia // *Cont. Shelf Res.* 1995. Vol. 15. P. 357-368.
33. Inall V.E., Shapiro G.I., Sherwin T.J. Mass transport by nonlinear internal waves on the Malin Shelf // *Cont. Shelf Res.* 2001. Vol. 21. P. 1449-1472.

#### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ростов И.Д., Гладышев С.В., Новотрясов В.В. Районирование северо-западной части Тихого океана по профилям частоты Вьяйсяля-Брента и оценки значений параметров внутренних волн. М., 1988. 13 с.- Деп. в ВИНТИ 15.01.88. № 321-В88.
2. Ростов И.Д., Гладышев С.В., Новотрясов В.В. Оценки возможных значений параметров внутренних волн для различных типов стратификации вод северо-западной части Тихого океана // *Морской гидрофиз. журн.* 1988. № 4. С. 59-61.
3. Новотрясов В.В., Симоненко С.В. Об интерпретации эмпирических ортогональных функций и вертикальной структуры вариаций температуры полусуточного периода // *Изв. АН СССР. ФАО.* 1989. Т. 25, № 3. С. 327-330.
4. Коган В.Я., Новотрясов В.В. Об акустическом методе исследования модовой структуры внутренних волн // *Изв. АН СССР. ФАО.* 1990. Т. 26, № 4. С. 437-440.

5. Навроцкий В.В., Новотрясов В.В. Вертикальная структура внутренних волн и эмпирические ортогональные функции. – Тр. X Всесоюзного симпозиума по дифракции и распространению волн (СДВ-90). Винница. 1990. Т. II. С. 307-311.
6. Новотрясов В.В., Юрасов Г.И. Эмпирические ортогональные функции и вертикальная структура внутренних волн // *Океанология*. 1991. Т. 31, вып. 3. С. 395-399.
7. Новотрясов В.В. Дисперсионные зависимости и вертикальная структура поля внутренних гравитационных волн на течении со сдвигом скорости // *Океанология*. 1991. Т. 31, вып. 6. С. 885-891.
8. Новотрясов В.В. Исследование вертикальной структуры внутренних гравитационных волн в океане: Дис. канд. физ.-мат. наук 11.00.08 Владивосток. 1992. 130 с.
9. Новотрясов В.В. О вертикальной структуре приливных внутренних волн в океане // *Изв. РАН. ФАО* 1993. Т 29, № 2. С. 283-286.
10. Новотрясов В.В. О возбуждении стоячих по вертикали приливных внутренних волн в открытом океане // *Океанология*. 1994. Т. 34, № 3. С. 370-374.
11. Новотрясов В.В. О голубом смещении частоты инерционных колебаний в океане // *Океанология*. 1998. Т. 38, вып. 1. С. 64-67.
12. Новотрясов В.В. Модель инерционных колебаний с учётом вязкости // *Изв. РАН. ФАО*. 1998. Т. 34, № 5. С. 730-732.
13. Долгих Г.И., Новотрясов В.В., Павлова Е.П. Наблюдение прилива Японского моря с помощью лазерного деформографа // *Метеорология и гидрология*. 1999. №8. С. 99-104.
14. Долгих Г.И., Новотрясов В.В. Низкочастотные литосферные деформации шельфовой зоны Японского моря, вызванные внутренними гравитационными волнами // *Физика Земли*. 1999. Т.35, № 11. С. 85-90.
15. Долгих Г.И., Новотрясов В.В., Карнаухов А.А. Деформометрический метод измерения морского прилива в прибрежной зоне Японского моря // *Океанология*. 2000. Т.40, № 6. С. 942-946.
16. Новотрясов В.В., Ванин Н.С. Низкочастотные внутренние волны в прибрежной зоне Японского моря // *Изв. РАН. ФАО*. 2002. Т. 38, № 4. С. 557-565.
17. Долгих Г.И., Новотрясов В.В., Пермяков М.С. Особенности сверхнизкочастотных деформаций земной коры побережья Японского моря после шторма // *Докл. АН*.

2003. Т. 389, № 4. С. 532-534.
18. Новотрясов В.В. О спектре нелинейных внутренних волн Кельвина // Докл. АН 2003. Т. 392, № 2. С. 254-257.
19. Новотрясов В.В., Храпченков Ф.Ф. Нелинейные внутренние волны мелкого моря // Доклады X школы-семинара акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана» -М.: ГЕОС 2004. С. 536-540.
20. Новотрясов В.В., Филонов А.Е. О спектре нелинейных внутренних волн в горизонтально неоднородном мелком море // Докл. АН. 2005. Т. 400, № 6. С. 818-821.
21. Новотрясов В.В., Ванин Н.С., Карнаухов А. А. Проявление нелинейных свойств у внутренних волн Кельвина в прибрежной зоне Японского моря // Изв. РАН. ФАО. 2005. Т. 41, № 5. С. 673-681.
22. Ростов И.Д., Н.И. Рудых, В.В. Новотрясов Электронный атлас гидрофизических характеристик района юго-восточной части полуострова Камчатка // Океанология. 2005. Т. 45, №4. С.717-721.
23. Navrotsky V., V. Novotraysov Inertial motions and internal waves in the ocean frontal zone // International conference "OCEANIC FRONTS AND RELATED PHENOMENA" Russia. St. Petersburg. 18-22 May. 1998. P. 367-370.
24. Novotryasov V.V., Navrotsky V.V. On the generation of vertical standing tidal internal waves in the ocean // "Mezo and Micro Structure of the Ocean - Measurement and Model of Processes". International Session. S.-Peterbyrg, 1992. P. 34.
25. Novotraysov Vadim V. Strong turbulence of internal nonlinear Kelvin waves // IUGG 2003. Sapporo Japan, June 30 – July 11. 2003. B.117.
26. Filonov A., Novotraysov V. Features of the nonlinear internal wave spectrum in the coastal zone // Geophys. Res. Lett., 2005. 32, L15602,doi:10.1029/2005GL023046.
27. Novotraysov V., Filonov A. On the nonlinear internal wave spectrum in the coastal zone // Inter. conf.: "FLUXES AND STUCTURES IN FLUIDS" Selected Papers. Moscow. 2006. P. 248-254.



**Новотрясов Вадим Васильевич**

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ  
ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ ОКЕАНА**

**Автореферат**

**Подписано к печати 30.09.06**

**Формат 60x80/16. Уч. – изд. л. 2. Тираж 100 экз.**

**Заказ 55. Бесплатно**

---

**Отпечатано в ОНТИ Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва  
ДВО РАН 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43.**