

На правах рукописи



ПОЛУХИН Николай Владимирович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ
НЕЛИНЕЙНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ОКЕАНЕ**

25.00.28 – Океанология

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2005

Работа выполнена в Нижегородском государственном техническом университете и Институте прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород).

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Е.Н. Пелиновский

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук Е.Г. Морозов

(Институт Океанологии РАН, Москва)

Доктор физико-математических наук А.Н. Серебряный

(ГНЦ РФ Акустический Институт им. акад. Н.Н. Андреева, Москва)

Ведущая организация – ГНЦ РФ Арктический и Антарктический научно-исследовательский Институт (г. Санкт-Петербург)

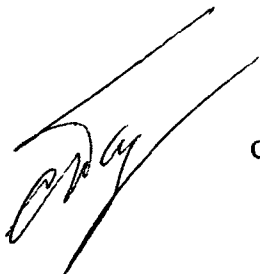
Защита состоится «13» декабря 2005 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета К 002.239.01 при институте Океанологии им. П.П. Ширшова РАН по адресу:

117997, г. Москва, Нахимовский пр., 36

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института Океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Автореферат разослан «16» ноября 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук



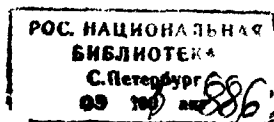
С.Г. Панфилова

Актуальность темы диссертации

Исследования внутренних гравитационных волн в океане проводятся весьма активно в настоящее время. Особый интерес вызывают внутренние волны большой амплитуды в шельфовой зоне, достигающие десятков метров, наиболее сильно влияющие на процессы тепло и массообмена, переноса различных примесей, распространения радиоволн и акустических сигналов, размыва донного грунта. Такие волны в основном являются нелинейными и существуют в виде одиночных волн – солитонов и их групп (солиборов), которые могут распространяться на большие расстояния без потери энергии. Они повсеместно наблюдаются в прибрежной зоне морей [Apel et al, 1985; Jeans, 1995; Small et al, 1999; Серебряный, 1993; Сабинин, Серебряный, Назаров, 2004], так что ответ на поставленный в 1989 году вопрос «существуют ли внутренние солитоны в океане?» [Ostrovsky & Stepanyants, 1989] к настоящему моменту стал утвердительным. Выполнен большой объем лабораторных исследований свойств нелинейных внутренних волн в стратифицированных бассейнах [Кистович, Чашечкин, 1990; Michalet, Barthelemy, 1998; Maderich, Heijst, Brandt, 2001; Grue et al., 1999, 2000; Ostrovsky & Stepanyants, 2005]. Поэтому моделирование интенсивных нелинейных внутренних волн представляется актуальным и практически значимым. Для моделирования трансформации волн в горизонтально-неоднородном океане используется модель, основанная на уравнении Гарднера [Holloway et al, 1997; Liu et al., 1998; Талипова, Пелиновский, Холловэй, 1999; Holloway, Pelinovsky, Talipova, 2001]. Параметры модели связаны со стратификацией водных масс, и их исследование важно при решении многих прикладных задач океанологии. Настоящая диссертация посвящена изучению пространственной изменчивости кинематических характеристик длинных нелинейных внутренних волн и численному моделированию их эволюции при распространении в океане с реально изменчивой горизонтально-неоднородной гидрологией.

Цели диссертационной работы

1. Построение карт кинематических характеристик поля внутренних волн различного масштаба на базе существующих гидрологических данных (атласов и экспедиционных данных); исследование географических и сезонных особенностей распределения параметров внутренних волн.
2. Оценка влияния сдвигового горизонтального течения на характеристики и динамику поля внутренних волн.
3. Численное моделирование динамики короткопериодных внутренних волн в горизонтально-неоднородном океане при различных условиях.



4. Анализ возможности образования сильно нелинейных (солитоноподобных) волн в арктических морях, особенностей их эволюции и трансформации.
5. Исследование влияния уединенных внутренних волн большой амплитуды на динамику примесей в приповерхностном слое и построение адекватной численной модели.

Научная новизна работы подтверждается следующими оригинальными результатами:

1. Создан атлас кинематических характеристик внутренних волн для Мирового океана, с помощью которого можно оценить горизонтальную изменчивость поля внутренних волн. Показано, что параметры линейной скорости распространения и дисперсии хорошо коррелируют с глубиной бассейна, в то время как для параметров нелинейности такая корреляция отсутствует.
2. Численное моделирование эволюции внутренних волн на реальных шельфах в арктических морях России в рамках обобщенного уравнения Гарднера с учетом вращения Земли, диссипации и реальной изменчивости гидрологических полей по трассе распространения показало, что нелинейные образования (солитоны и солиборы) возникают в широком диапазоне изменения параметров океана.
3. Показано, что наличие сдвиговых течений может существенно изменять как линейные, так и нелинейные кинематические характеристики внутренних волн, и оказывать существенное влияние на их динамику при определенных условиях, например, вблизи устьев рек.
4. Построена численная модель воздействия внутренних волн на динамику примесей в приповерхностном слое с учетом процессов диффузии и релаксации и выполнены расчеты изменения концентрации примеси под действием солитонов внутренних волн.
5. В общем случае трехмерных внутренних волн развит лучевой подход, включающий последовательность более простых шагов: расчет лучевых траекторий в горизонтальной плоскости, вычисление переменных коэффициентов обобщенного уравнения Гарднера и моделирование волн вдоль лучей.
6. Рассмотрена трансформация внутренних солитонов в рамках уравнения Гарднера для случая цилиндрической расходимости волн. Показаны различные возможные сценарии ослабления уединенных волн, определяемые знаком кубической нелинейности. Проведено сравнение с динамикой процесса в рамках уравнения Кортевега – де Вриза.

Научная и практическая значимость работы

Атласы рассчитанных параметров внутренних волн для всего Мирового океана и отдельных его акваторий могут применяться как при непосредственном моделировании трансформации длинных внутренних волн в выбранной акватории, так и для экспресс-оценок формы, полярности и амплитуды солитонов внутренних волн, а также для качественного прогноза процессов их распространения и интерпретации результатов натуральных экспериментов. Проанализированное влияние скорости сдвигового течения на поведение коэффициентов модели показывает существенную значимость этого фактора и необходимость его учета в некоторых случаях. Моделирование трансформации внутренних волн на арктических шельфах с учетом реальной горизонтальной изменчивости гидрологических полей имеет **важное практическое значение** для предсказания возможных форм и амплитуд внутренних волн в Северном Ледовитом океане. Результаты представленной диссертации использовались в нескольких российских (РФФИ: 00-05-64223, 03-05-64978, 05-05-64333; программа Министерства науки и РАН «Нелинейная динамика»; проект 5.14 Федеральной целевой программы «Мировой океан») и международных (ИНТАС: 01-0025, 03-51-3728; TEMPUS JER-10460-98) исследовательских проектах, выполняемых с участием автора диссертации. Отдельные этапы работ были поддержаны грантами РАН (349 – 6-ой конкурс-экспертиза 1999 г.) и научной школой академика В.И. Таланова НШ-1637.2003.2. Диссертант являлся руководителем молодежных грантов РФФИ (02-05-06042, 03-05-06126).

Апробация работы

Основные результаты диссертации представлялись на конференции Австралийского математического общества (Мельбурн, 1999), II международной конференции "Производство, технология, экология – образование в технических университетах на пороге XXI века" (Москва, 1999), международном семинаре "Jonsmod/Medmod 2000" (Тулон, 2000), международных конференциях "Third Workshop on Land Ocean Interaction in the Russian Arctic" (Москва, 2000), "Progress in Nonlinear Science" (Нижний Новгород, 2001), "Fluxes and Structures in Fluids" (Москва, 2005), международном симпозиуме "Topical Problems of Nonlinear Wave Physics" (Нижний Новгород, 2003), на ежегодных сессиях Европейского Геофизического Союза (2000, 2002 – 2005); неоднократно докладывались на семинарах Нижегородского государственного технического университета, Института прикладной физики РАН, а также Арктического и Антарктического научно-исследовательского Института; опубликованы в журналах "Океанология", "Известия Академии инженерных наук РФ" и в

монографии «Поверхностные и внутренние волны в арктических морях».

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, двух приложений и списка литературы, содержащего 166 наименований. Общий объем диссертации – 200 страниц, включая 106 рисунков и 11 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели, новизна, научная и практическая ценность, апробация, список публикаций по теме диссертации, основные положения, выносимые на защиту, краткое содержание диссертации.

Глава 1 посвящена климатическим оценкам основных параметров численной модели трансформации поля короткопериодных внутренних волн, как для всего Мирового океана, так и для отдельных его бассейнов. В качестве исходного материала использованы усредненные данные различных гидрологических атласов с различным разрешением, а также непосредственно данные экспедиционных измерений. Изучена географическая и сезонная изменчивость скорости распространения внутренних волн, параметра дисперсии, квадратичной и кубической нелинейности. Результаты представлены в виде карт распределения параметров модели различных масштабов, и по существу, представляют собой первый вариант атласа кинематических и нелинейных параметров внутренних волн на основе глобальных гидрологических данных.

В § 1.2 приведен кратко вывод основного нелинейного эволюционного уравнения в теории внутренних волн – уравнения Гарднера, которое имеет вид:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (c + \alpha \eta + \alpha_1 \eta^2) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0, \quad (1)$$

где x – горизонтальная координата, t – время, η – смещение изопикнических поверхностей в точке максимума линейной моды $\Phi(z)$, которая находится как решение краевой задачи

$$L\Phi \equiv \frac{d}{dz} \left[(c - U(z))^2 \frac{d\Phi}{dz} \right] + N^2(z)\Phi = 0 \quad (2)$$

с нулевыми граничными условиями на дне и поверхности океана (здесь z – вертикальная координата, N – частота Вьяйсяля–Брента, U – скорость горизонтального сдвигового течения, c – собственное значение задачи, определяющее скорость распространения длинной линейной волны). Коэффициенты нелинейности α и α_1 и дисперсии β уравнения (1) определяются сложными интегральными выражениями от Φ и U , и здесь не приводятся [Полухин и др., 2004]. Уравнение (1) является основным

для описания большинства эффектов, изучаемых в диссертации.

В § 1.3 описана методология и численные программы обработки исходных гидрологических данных и вычисления коэффициентов нелинейных эволюционных уравнений для внутренних волн.

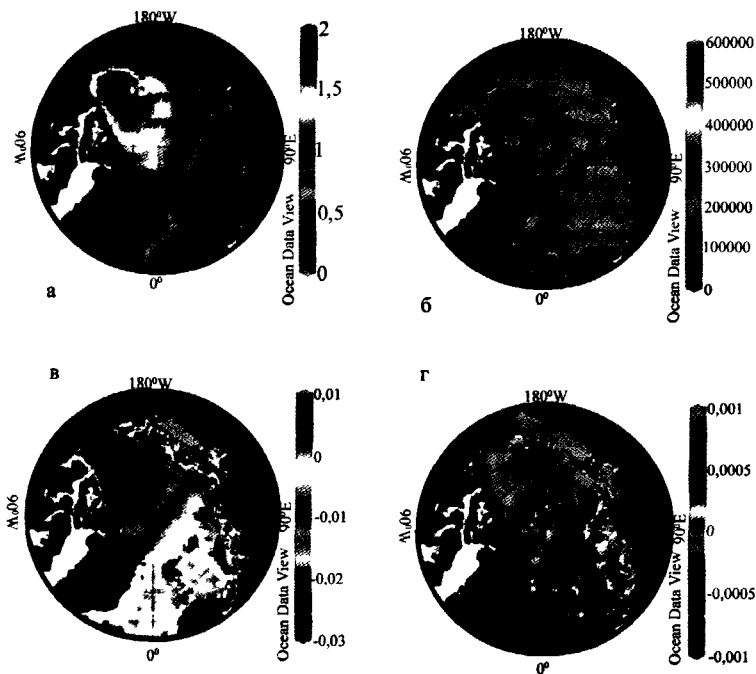


Рис. 1 Карты распределения параметров уравнения Гарднера для внутренних волн по данным Арктического атласа: *а* – скорости распространения (шкала в м/с), *б* – параметра дисперсии (шкала в м²/с³), *в* – квадратичной нелинейности (шкала в 1/с), *г* – кубической нелинейности (шкала в 1/(м·с))

В § 1.4 приведены рассчитанные карты кинематических характеристик поля внутренних волн в Мировом океане (с разрешением в один градус и 1/4 градуса), а также обсуждаются их широтные распределения. Формализованные зависимости фазовой скорости и дисперсии внутренних волн от глубины на разных широтах удобны для экспресс-оценок. Коэффициенты квадратичной и кубической нелинейности испытывают большой разброс от места к месту. Следует отметить, что оба нелинейных коэффициента меняют знак с глубиной на всех широтах, что важно при определении свойств нелинейных

внутренних волн, так, например, возможна генерация особых типов нелинейных волн – солитонов обеих полярностей, так называемых толстых солитонов и бризеров.

В § 1.5 даны более подробные карты для бассейна Северного Ледовитого океана (рис. 1), здесь же выполнено сравнение карт, построенных с разным разрешением. На основе расчетов по двум атласам с разной степенью дискретизации данных (одноградусная и 50-километровая сетки) можно сделать заключение, что в глубоководных акваториях (центральная часть Северного Ледовитого океана) все параметры модели не имеют качественных отличий; в мелководной шельфовой зоне различия в значениях параметров нелинейности могут быть существенными, вплоть до порядка, и даже до знака. Поэтому для мелководных акваторий нужно использовать более подробные данные на более мелкой сетке.

Еще более точные карты построены для акватории моря Лаптевых на основе данных гидрологической съемки на 131 станции (§ 1.6).

Результаты исследования влияния сдвигового течения на вертикальную структуру внутренних волн и их кинематические характеристики в Карском море (в зоне влияния речных вод) приведены в § 1.7. Показано, что в некоторых ситуациях учет фонового течения в модели может привести к значительным изменениям значений параметров нелинейности и фазовой скорости, а вот параметр дисперсии менее всего чувствителен к нему.

В заключении (§ 1.8) суммированы полученные в Главе I результаты.

В главе 2 приводятся результаты численного моделирования эволюции короткопериодных внутренних волновых возмущений в горизонтально-неоднородном океане в рамках обобщенного уравнения Гарднера в условиях арктического бассейна. Вывод этого уравнения воспроизводится в § 2.2, где также обсуждается учет вращения Земли и диссипации. Основное уравнение модели записывается в виде:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \left(\frac{\alpha Q}{c^2} \zeta + \frac{\alpha_1 Q^2}{c^2} \zeta^2 \right) \frac{\partial \zeta}{\partial s} + \frac{\beta}{c^4} \frac{\partial^3 \zeta}{\partial s^3} - \frac{\nu}{c^3} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial s^2} - \frac{kcQ}{\beta} \zeta |\zeta| = \frac{f^2}{2c} \int \zeta ds \quad (3)$$

где $s = t - \int dx/c(x)$ – время в системе отсчета, движущейся вместе с линейной волной, волновая функция $\zeta(x, s) = \eta(x, s)/Q(x)$, Q – фактор линейного усиления волны, f – параметр Кориолиса, связанный с периодом вращения Земли $T_e = 24$ часа и географической широтой φ : $f = (4\pi/T_e) \sin \varphi$, ν – коэффициент горизонтальной диффузии, k – коэффициент трения в придонном турбулентном слое. Обобщенное уравнение Гарднера, записанное в форме (3) решается с начальным условием, соответствующим записи волны в определенной точке $x = x_0$:

$$\zeta(x = x_0, s) = f(s), \quad (4)$$

и периодическими граничными условиями. По существу, обобщенное уравнение Гарднера (3) может рассматриваться как пространственная версия нелинейного эволюционного уравнения, и «начальное» условие для него соответствует временной записи волновых возмущений в фиксированной точке x_0 . Обобщенное уравнение Гарднера (3) является основным уравнением для описания трансформации внутренних волн в последующих параграфах.

§ 2.3 содержит расчеты трансформации внутренних солитонов при распространении по переменной трассе на примере трех разрезов в море Лаптевых, обеспеченных данными полигонных измерений и соответствующими расчетами характеристик поля внутренних волн (§ 1.6). Описаны возможные формы солитонов, определены их параметры при адиабатическом распространении вдоль одного из разрезов. Численные расчеты демонстрируют сложную картину трансформации солитона в арктическом бассейне с учетом вращения Земли и реальной изменчивости гидрологических полей по трассе распространения. В результате солитоны одной полярности могут приводить к генерации солитонов другой полярности и появлению цуга интенсивных мелкомасштабных волн (рис. 2)

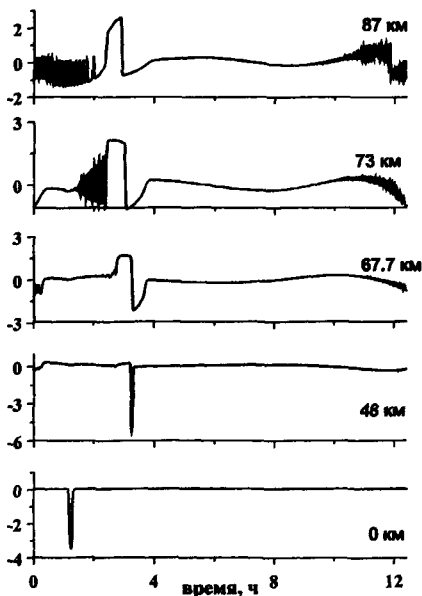


Рис. 2
Трансформация солитона с начальной амплитудой 3.6 м на Янском разрезе в море Лаптевых

В § 2.4 приведены результаты моделирования трансформации внутреннего бора (рис. 3), измеренного в Баренцевом море [Шапиро и

др, 2000]. Сделаны оценки времени жизни нелинейной структуры внутреннего бора, наблюдаемого на мелководье; исследовано влияние диссипации на процесс эволюции солибора. Исследована также задача «обратного» распространения, позволившая определить волновые поля, эволюция которых приводит к возникновению внутреннего бора.

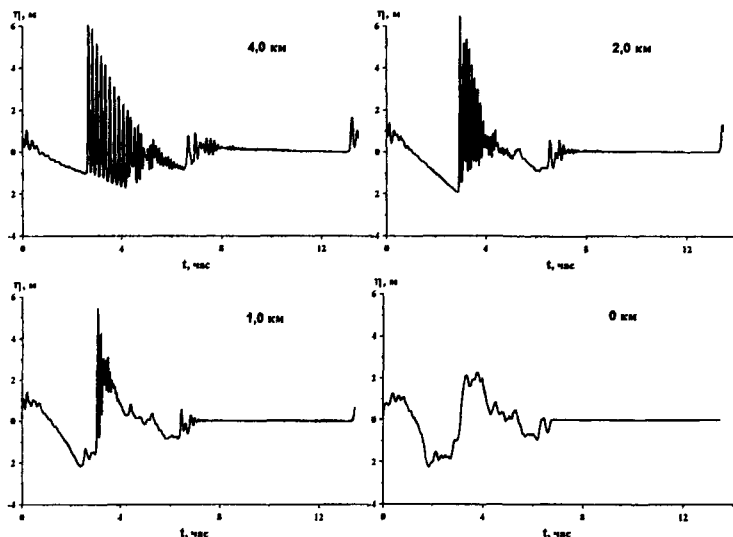


Рис. 3 Трансформация внутреннего бора в Печорском море

В § 2.5 приведены результаты модельного расчета трансформации внутренней волны приливного периода на полигоне в Карском море. Показано, что учет сдвигового течения может сильно менять структуру поля внутренних волн в устьевой зоне (см. рис. 4).

В § 2.6 моделируется динамика поверхностных примесей в поле рассчитанных внутренних волн для условий моря Лаптевых. Исследовано перераспределение концентрации поверхностно-активных веществ (ПАВ) поверхностным течением, создаваемым внутренним солитоном, с учетом процессов диффузии и релаксации. Показано, что вместе с солитоном отрицательной полярности движется волна увеличения концентрации ПАВ, а за ним следует волна понижения концентрации. При смене полярности солитона соответственно меняется и направление изменения концентрации. Изучено влияние амплитуды внутреннего солитона на величину изменения концентрации ПАВ. Рост амплитуды солитона приводит сначала к сужению области следа и росту концентрации, а при дальнейшем увеличении амплитуды и

приближении ее к предельной – вновь к расширению области следа при росте концентрации.

В заключении (§ 2.7) перечислены основные результаты Главы 2.

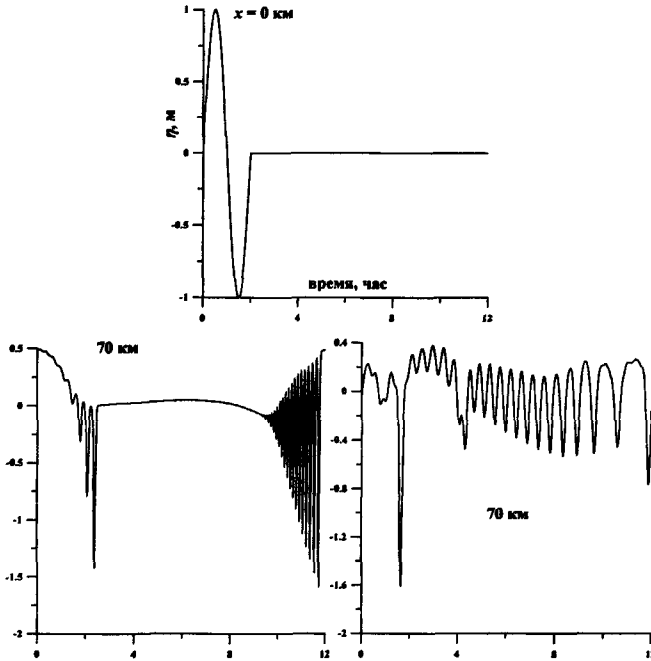


Рис. 4 Трансформация волны начальной амплитуды 1 м вдоль Енисейского разреза: сверху – начальная форма волны, внизу – форма волны через 70 км: слева – без учета течения, справа – с учетом течения

В главе 3 проводится исследование трансформации внутренних волн в трехмерно-неоднородном океане в рамках различных теоретических моделей.

В § 3.2 применена линейная модель рефракции для расчета лучевых траекторий внутренних волн. Зависимость фазовой скорости от времени не учитывается в работе, поскольку даже сезонные изменения этого параметра не велики для внутренних волн. Таким образом, при построении модели мы считали, что рефракция внутренних волн преимущественно определяется пространственной неоднородностью стратификации и глубины океана. Модель протестирована на аналитическом примере и показала хорошее согласие расчетов.

В § 3.3 проведены расчеты лучевых траекторий и фронтов внутренних волн в гидрологических условиях, соответствующих Баренцеву морю, и сделана попытка интерпретации космического снимка, приведенного в [Дикинис и др., 1999]. Расчеты формы лучей и фронтов внутренних волн производились как с использованием поля фазовой скорости на основе усредненных данных атласа [Joint US – Russian Atlas, 1998] для летнего сезона, так и в предположении двухслойной модели стратификации. Результаты расчетов в предположении двухслойной стратификации вод наиболее соответствуют фронтам (см. рис. 5).



Рис. 5 Слева – радиолокационное изображение акватории Баренцева моря южнее о. Новая Земля, 05.07.1991 – из атласа [Дикинис и др., 1999] и фронты внутренних волн на нем. Справа – фронты, рассчитанные в предположении двухслойной стратификации и реальной батиметрии

В § 3.4 проведено сравнение двух подходов к описанию рефракции нелинейных внутренних волн и показано, что оба подхода (основанные на пространственно-двумерной [Djordjevic & Redekopp, 1978] и лучевой [Пелиновский, Талипова, Степанянц, 1994] версиях уравнения Кортевега – де Вриза) эквивалентны и сводятся один к другому.

В § 3.5 теоретически и численно рассматривается трансформация цилиндрических уединенных внутренних волн в рамках лучевой версии уравнения Гарднера

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \left(\frac{\alpha Q}{c^2} \zeta + \frac{\alpha_1 Q^2}{c^2} \zeta^2 \right) \frac{\partial \zeta}{\partial \tau} + \frac{\beta}{c^4} \frac{\partial^3 \zeta}{\partial \tau^3} = 0, \quad (5)$$

где l – расстояние вдоль луча, τ – время в сопровождающей системе отсчета, $Q = \sqrt{l_0/l}$, гидрология считается постоянной. Определены зависимости амплитуд солитонов от расстояния для различных условий. В случае, когда кубическая нелинейность положительна, и солитоны ограничены по амплитуде снизу, происходит превращение солитона в бризер – нелинейный осцилляторный волновой пакет (рис. 6).

В заключении (§ 3.6) приводятся основные результаты Главы 3.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В Приложении А описана процедура расчета плотности морской воды, основанная на уравнении ее состояния [Fofonoff & Millard, 1983].

Приложение Б содержит методику вычисления профилей скорости течения по данным результатов прямых измерений течений.

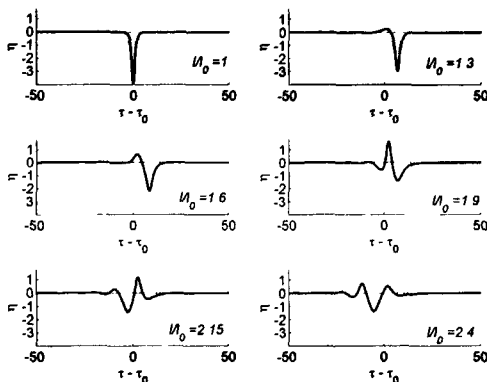


Рис. 6 Трансформация солитона в бризер при цилиндрической расхожимости; $\alpha_1 > 0$, солитон имеет противоположную полярность по сравнению со знаком α (τ_0 – начальная координата центра солитона)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основании гидрологических атласов и теоретической модели обобщенного уравнения Гарднера создан атлас кинематических характеристик внутренних волн для Мирового океана, демонстрирующий их горизонтальную изменчивость. Построены широтные распределения кинематических характеристики поля внутренних волн в Мировом океане. Приведены карты среднесеклиматических величин коэффициентов уравнения Гарднера для всего Мирового океана, построенные по гидрологическим атласам с различным пространственным разрешением. Определены географические особенности распределения. Показано, что сезонным изменениям наиболее подвержены нелинейные характеристики. Для бассейна Северного Ледовитого океана проведено сравнение расчетов по двум различным гидрологическим атласам.
2. В рамках модели, основанной на уравнении Гарднера, показана возможность образования сильно нелинейных (солитоноподобных) волн в арктических морях. Описаны возможные формы солитонов, определены их параметры при адиабатическом распространении.

Выполнены расчеты, демонстрирующие сильную трансформацию и разрушение солитонов при распространении в арктических морях. Сделаны оценки времени жизни внутреннего солибора, наблюдаемого на мелководье (Печорское море); исследовано влияние диссипации на процесс эволюции солибора.

3. Выполнено сравнение двух подходов к описанию рефракции нелинейных внутренних волн и показано, что оба подхода (основанные на пространственно-двумерной и лучевой версиях уравнения Кортевега – де Вриза) эквивалентны и сводятся один к другому. Исследована нелинейная динамика трехмерных внутренних волн в рамках лучевой версии уравнения Гарднера. Проведены расчеты лучевых траекторий и фронтов внутренних волн в гидродинамических условиях, соответствующих Баренцеву морю, и проведена интерпретация космического изображения внутренних волн. Показаны различные возможные сценарии распространения цилиндрических уединенных волн, определяемые знаком кубической нелинейности.
4. Показано, что учет фонового сдвигового течения в устьевых районах арктических морей может привести к значительным изменениям значений параметров нелинейности и фазовой скорости, в то время как параметр дисперсии менее всего чувствителен к нему. Продемонстрировано, что учет сдвигового течения в этих областях сильно меняет пространственную структуру поля внутренних волн.
5. Рассчитанные характеристики поля короткопериодных внутренних волн применены для моделирования динамики примесей на поверхности жидкости и выполнены расчеты концентрации примеси с учетом процессов диффузии и релаксации в условиях моря Лаптевых.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дикинис А.В., Иванов А.Ю., Карлин Л.Н. и др. Атлас аннотированных радиолокационных изображений морской поверхности, полученных космическим аппаратом «АЛМАЗ-1». // Под ред. Карлина Л. Н. М.: ГЕОС. 1999. 118 с.
2. Кистович Ю.В., Чашечкин Ю.Д. Генерация, распространение и нелинейное взаимодействие внутренних волн // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. М.:ВИНИТИ. 1990, Т.24. С.77–144.
3. Пелиновский Е.Н., Талипова Т.Г., Степаняц Ю.А. Моделирование распространения нелинейной внутренней волны в горизонтально неоднородном океане // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30, № 1. С. 79–85.
4. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н., Назаров А.А. Интенсивные внутренние волны в Мировом океане // Океанология. 2004. Т. 44, № 6. С. 805–810.

5. **Серебряный А.Н.** Проявление свойств солитонов во внутренних волнах на шельфе // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 29, №2. С. 244–252.
6. **Талипова Т.Г., Пелиновский Е.Н., Холловэй П.Е.** Нелинейные модели трансформации внутренних приливов на шельфе // Приповерхностный слой океана. Физические процессы и дистанционное зондирование. 1999. Т. 1. С. 154–172.
7. **Шапиро Г.И., Шевченко В.П., Лисицын А.П., Серебряный А.Н., Политова Н.П., Акивис Т.М.** Влияние внутренних волн на распределение взвешенного вещества в Печорском море // ДАН. 2000. Т.373, №1. С. 105–107.
8. **Apel J.R., Holbrock J.R., Liu A.K., Tsai J.J.** The Sulu sea internal soliton experiment // J.Phys.Oceanogr. 1985. V. 15. P. 1625–1651.
9. **Djordjevic V.D., Redekopp L.G.** The fission and desintegration of internal solitary waves moving over two-dimensional topography // J. Phys. Oceanogr. 1978. V. 8. P. 1016–1024.
10. **Fofonoff N., Millard R. Jr.** Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. // UNESCO Technical Papers in Marine Science No. 44. 1983. P. 15–25.
11. **Grue J., Jensen A., Rusaas P.-O., Sveen J.K.** Properties of large amplitude internal waves // J. Fluid Mech. 1999. V.380. P. 257–278.
12. **Grue J., Jensen A., Rusaas P.-O., Sveen J.K.** Breaking and broadening of internal solitary waves // J. Fluid Mech. 2000, V.413. P. 181–217.
13. **Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T.** Internal tide transformation and oceanic internal solitary waves // Chapter 2 in the book: Environmental Stratified Flows (Ed. By R. Grimshaw). Kluwer Acad. Publ. 2001. P. 29–60.
14. **Holloway P., Pelinovsky E., Talipova T., Barnes B.** A Nonlinear Model of Internal Tide Transformation on the Australian North West Shelf // J. Physical Oceanography. 1997. V. 27, No 6. P. 871–896.
15. **Jeans D.R.G.** Solitary internal waves in the ocean: A literature review completed as part of the internal wave contribution to Morena // UCES, Marine Science Labs, University of North Wales. (1995). Rep. U-95.
16. **Joint U.S. - Russian Atlas of the Arctic Ocean.** // University of Colorado, Boulder, CO P.B. 449, 80309-0449. 1998.
17. **Liu A.K., Chang Y.S., Hsu M.-K., Liang N.K.** Evolution of nonlinear internal waves in the East and South China Seas // J. Geophys. Res. 1998. V. 103, C4. P. 7995–8008.
18. **Maderich V, Heijst GJ, Brandt A.** Laboratory experiments on intrusive flows and internal waves in a pycnocline // J. Fluid Mech. 2001. V. 432. P. 285–311.
19. **Michallet H., Barthelemy E.** Experimental study of interfacial solitary waves // J. Fluid Mech. 1998. V. 366. P. 159–177.
20. **Ostrovsky L., Stepanyants Yu.** Do internal solitons exist in the ocean? // Review Geophysics. 1989. V.27. P. 293–310.

21. **Ostrovsky L., Stepanyants Yu.** Internal solitons in laboratory experiments: comparison with theoretical models // *Chaos*. 2005. V. 15. 037111. P. 1–15.
22. **Small J., Hallock Z., Pavey G., Scott J.C.** Observations of large amplitude internal waves at the Malin Shelf edge during SESAME 1995 // *Cont. Shelf Res.* 1999. V.19. P. 1389–1436.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Е. Pelinovsky, N. **Polukhin**, О. Polukhina, А. Slunyaev, Т. Talipova. Nonlinear models of stratified flows // Книга резюме 2-ой Международной конференции "Производство, технология, экология – образование в технических университетах на пороге XXI века". М. Изд-во СТАНКИН. 1999. С. 30.
2. Е.Н. Пелиновский, **Н.В. Полухин**, Т.Г. Талипова. Географическое и сезонное распределение фазовой скорости линейных внутренних волн в Мировом океане // *Известия АИИ РФ, сер. Прикладная математика и информатика*. 2000. Т. 1. С. 133–143.
3. Е. Pelinovsky, Т. Talipova, N. **Poloukhin**. World Atlas of the prognostic parameters of the internal wave propagation // *Geophysical Research Abstracts*. 2000. V. 2. P. 635.
4. Е. Pelinovsky, Т. Talipova, А. Slunyaev, N. **Poloukhin**, О. Poloukhina. Modeling of the nonlinear-dispersive internal wave field. // *Abstracts of Workshop "Jonmod/Medmod 2000"* (Toulon, France 8-14 July 2000). 2000. P. 34.
5. **Н.В. Полухин**, О.Е.Полухина, В.Рей. Транспорт донных наносов под воздействием поверхностных волн // *Известия АИИ РФ, сер. Прикладная математика и информатика*. 2000. Т. 1. С. 181–193.
6. N. **Poloukhin**, Е. Pelinovsky, Т. Talipova. Kinematic parameters of long internal wave field in Arctic Basin // *Abstracts of "Third Workshop on Land Ocean Interaction in the Russian Arctic"*. Moscow. 2000. V. 1. P. 118–119.
7. Т.Г. Талипова, **Н.В. Полухин**. Анализ средних характеристик параметров распространения длинных внутренних волн в Мировом океане. // *Известия АИИ РФ, сер. Прикладная математика и информатика*. Т. 2. 2001. С. 139–155.
8. **Н.В. Полухин**. Влияние сдвиговых течений на вертикальную структуру и кинематические параметры внутренних волн // *Материалы 11-й Международной научно-практической конференции по графическим и информационным технологиям и системам «КОГРАФ-2001»*. Нижний Новгород. 27-30 ноября 2001. С. 262–268.
9. Е.Н. Пелиновский, **Н.В. Полухин**, Т.Г. Талипова. Моделирование характеристик поля внутренних волн в Арктике // В монографии «Поверхностные и внутренние волны в арктических морях». С.-ПБ.: Гидрометеониздат. 2002. С. 235–279.

10. O. Poloukhina, N. **Poloukhin**, T. Talipova, E. Pelinovsky, R. Grimshaw, K. Lamb, S. Muyakshin. Modelling of large-amplitude internal waves in the ocean // Proceedings of International Conference "Progress in Nonlinear Science". Nizhny Novgorod, Russia. 2002. V. 2. P. 252–257.
11. Т.Г. Талипова, **Н.В. Полухин**. Численное моделирование внутренних волн на шельфе Карского моря // Известия АИН РФ, сер. Прикладная математика и механика. 2002. Т. 3. С. 12–22.
12. **Н.В. Полухин**. Рефракция внутренних волн в Баренцевом море // Материалы 12-й Международной научно-практической конференции по графическим и информационным технологиям и системам «КОГРАФ-2002». Нижний Новгород. 26-28 ноября 2002. С. 10–11.
13. N. **Poloukhin**. The numerical model of internal wave refraction in the Arctic Basin // Geophysical Research Abstracts. 2002. V. 4. EGS02-A-02063.
14. T. Talipova, E. Pelinovsky, N. **Poloukhin**, O. Poloukhina, S. Muyakshin. Nonlinear internal waves on shelves of the Arctic Ocean // Geophysical Research Abstracts. 2002. V.4. EGS02-A-00629.
15. Е.Н. Пелиновский, Т.Г. Талипова, А.А. Куркин, А.В. Слюняев, О.Е. Полухина, **Н.В. Полухин**, А.В. Кокорина. Поверхностные и внутренние волны большой амплитуды в океане // Тезисы Юбилейной Всероссийской научной конференции «Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы». М.: МГУ. 2002. С. 49–50.
16. **Н.В. Полухин**, Т.Г. Талипова, Е.Н. Пелиновский, И.В. Лавренов. Кинематические характеристики поля высокочастотных внутренних волн в Северном Ледовитом океане. // Океанология. 2003. Т. 43, №3. С. 356–367.
17. Т.Г. Талипова, **Н.В. Полухин**, А.А. Куркин, И.В. Лавренов. Моделирование трансформации солитонов внутренних волн на шельфе моря Лаптевых // Известия АИН РФ, сер. Прикладная математика и механика. 2003. Т. 4 С. 3–16.
18. T. Talipova, O. Poloukhina, N. **Poloukhin**, A. Krasilshikov, I. Lavrenov. Dynamics of surface pollution induced by internal solitons in the Arctic Ocean // Abstracts of EGS – AGU – EUG Joint Assembly. Nice, France. April 2003. EAE03-J-00883.
19. T. Talipova, O. Poloukhina, N. **Poloukhin**, A. Krasilshikov, A. Kurkin. Modeling of transformation of the internal solitons on the ocean shelves and their manifestation on the surface // Proceedings of International Symposium "Topical Problems of Nonlinear Wave Physics". Nizhny Novgorod, Russia. September 2003. P. 373–374.
20. E. Pelinovsky, Xu Zhaoting, T. Talipova, Shen Guojin, A. Kurkin, N. **Poloukhin**. Two approaches to study nonlinear internal waves in the horizontal inhomogeneous ocean // Известия АИН РФ, сер. Прикладная математика и механика. 2003. Т. 4 С. 92–98.

21. **Н.В. Полухин**, Е.Н. Пелиновский, Т.Г. Талипова, С.И. Муякшин. О влиянии сдвиговых течений на вертикальную структуру и кинематические параметры внутренних волн // *Океанология*. 2004. Т.44, №1. С. 26–33.
22. **N. Poloukhin**, T. Talipova, A. Kurkin. Evolution of internal bore in Barents Sea // *EGU 1st General Assembly*. Nice, France. April 26–30. 2004. EGU04–A–00990.
23. O. Poloukhina, **N. Poloukhin**, T. Talipova, K. Lamb. Nonlinear internal wave generation by barotropic tide in the Arctic Basin // *EGU General Assembly*. Vienna, Austria. April 24–29. 2005. Geophysical research abstracts. V. 7. 04061. 2005 SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-04061. European Geosciences Union 2005.
24. **N.V. Polukhin**, T.G. Talipova, E.N. Pelinovsky, A.A. Kurkin Internal soliton parameters in East China and Japan Seas // *Book of Abstracts of International Conference “Fluxes and Structures in Fluids”*. Moscow. June 20–23, 2005. P. 91–92.
25. **Н.В. Полухин**, Т.Г. Талипова, А.А. Куркин, О.Е. Полухина, Сю Заотинг Кинематические параметры внутренних волн в Желтом, Японском и Восточно-Китайском морях // *Известия АИН РФ, сер. Прикладная математика и механика*. 2005. Юбилейный том. С. 46–53.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 Кинематические и нелинейные характеристики внутренних волн, основанные на данных о плотностной стратификации и вертикальном распределении течений	
§ 1.1. Введение	17
§ 1.2. Длинноволновые модели движений стратифицированной среды	18
§ 1.3. Расчет вертикальной структуры внутренних волн и вычисление коэффициентов уравнения Гарднера	28
§ 1.3.1. Обработка трехмерных распределений полей температуры и солёности	28
§ 1.3.2. Решение линейной краевой задачи и вычисление коэффициентов	29
§ 1.4. Атласы кинематических характеристик поля внутренних волн в Мировом океане	30
§ 1.4.1. Широтные изменения внутренних волн	30
§ 1.4.2. Расчеты на основе гидрологического атласа NOAA WOA'94	35
§ 1.4.3. Сезонные вариации параметров внутренних волн	37
§ 1.5. Параметры поля внутренних волн в Северном Ледовитом океане: сравнение расчетов на базе различных гидрологических источников	39

§ 1.6. Расчеты характеристик внутренних волн по данным экспедиционных наблюдений в море Лаптевых	42
§ 1.7. Влияние сдвиговых течений на параметры внутренних волн в Карском море	44
§ 1.7.1. Экспериментальные данные	44
§ 1.7.2. Результаты расчетов кинематических характеристик внутренних волн	45
§ 1.8. Заключение	48

ГЛАВА 2 Моделирование двумерных нелинейных внутренних волн в океане с горизонтальными вариациями поля плотности и течений

§ 2.1. Введение	75
§ 2.2. Обобщенное уравнение Гарднера	76
§ 2.3. Трансформация уединенных внутренних волн в море Лаптевых	81
§ 2.3.1. Формы солитонов внутренних волн на выбранных разрезах	83
§ 2.3.2. Распространение солитонов вдоль Ленского разреза	85
§ 2.3.3. Эволюция уединенных волн на Оленекском разрезе	87
§ 2.3.4. Трансформация солитонов на Янском разрезе	88
§ 2.4. Эволюция солибора в Печерском море	90
§ 2.4.1. Наблюдения внутреннего бора в Печерском море	92
§ 2.4.2. Кинематические характеристики внутреннего бора	93
§ 2.4.3. Начальная волна	94
§ 2.4.4. Результаты моделирования	95
§ 2.4.5. Влияние диссипации	98
§ 2.5. Влияние сдвиговых течений на распространение нелинейных внутренних волн	100
§ 2.5.1. Трансформация волны без учета течения	100
§ 2.5.2. Трансформация волны с учетом течения	102
§ 2.6. Численное моделирование воздействия интенсивных внутренних волн на динамику пленок на поверхности океана	103
§ 2.7. Заключение	108

ГЛАВА 3 Рефракционные модели внутренних волн в трехмерно – неоднородном океане

§ 3.1. Введение	151
§ 3.2. Лучевые методы в теории распространения длинных внутренних волн	153
§ 3.3. Интерпретация космического снимка внутренних волн в Баренцевом море	155
§ 3.3.1. Используемые данные	155
§ 3.3.2. Результаты моделирования	156

§ 3.4. Два подхода к описанию рефракции нелинейных внутренних волн.....	159
§ 3.5. Моделирование рефракции уединенной волны (солитона) в плавной неоднородной среде.....	167
§ 3.6. Заключение	171
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	183
ПРИЛОЖЕНИЕ А	185
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	186
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	190

4

5

6

7

8

9

Подписано в печать 07.11.2005 Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1. Зак. 1477. Тир. 150.

Типография Нижегородского госуниверситета.
Лиц. ПД № 18-0099 от 04.05.2001.
603000, Н. Новгород, ул. Б. Покровская, 37.

?

→

.

.

|

|

|

|

|

|

|

№ 22 146

РНБ Русский фонд

2006-4

18634