

На правах рукописи



ЕРМАКОВА Ольга Станиславовна

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
НЕЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН  
С ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ В ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ  
АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород  
2010

Работа выполнена в Институте прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Ю. И. Троицкая

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
М. А. Носов  
(Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова)

доктор физико-математических наук  
В. П. Реутов  
(Институт прикладной физики РАН)


Ведущая организация: Институт океанологии им. П. П.  
Ширшова РАН

Защита состоится 21 июня 2010 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.01 в Институте прикладной физики РАН по адресу: 603950 г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института прикладной физики РАН.

Автореферат разослан “ 19 ” мая 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук



А. И. Малеханов

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы диссертации.** Процессы тепломассоэнергообмена в пограничных слоях океана и атмосферы являются определяющими при формировании климата и погоды на всех масштабах изменчивости характеристик климатической системы. Они обусловлены турбулентным переносом в пограничных слоях атмосферы и океана, особенности которого во многом определяет присутствие ветрового волнения, согласованного с параметрами приводного пограничного слоя атмосферы и верхнего слоя океана. В связи с этим, проблема описания турбулентного переноса в этих пограничных слоях представляет собой сложную комплексную задачу, включающую в себя исследование взаимодействия турбулентности в приводном слое атмосферы и приповерхностном слое океана с поверхностными волнами. Важной частью этой проблемы является изучение взаимодействия волн с турбулентным ветровым потоком, процессов генерации турбулентности верхнего слоя океана поверхностными волнами с учетом механизмов обратного воздействия турбулентных пульсаций на волны, а также динамики турбулентности в водном и воздушном пограничных слоях.

Изучение механизмов генерации волн на поверхности океана турбулентным ветровым потоком является одной из наиболее важных задач взаимодействия поверхностных волн с турбулентностью в пограничных слоях океана и атмосферы. Развитые в настоящее время модели хорошо описывают генерацию пологих морских волн при умеренных скоростях ветра (см. [1\*–3\*] и ссылки в них). Однако вопрос об их применимости в случае крутых и обрушающихся волн, а также при сильном и штормовом ветре остается открытым. В последнее время для этих условий широко обсуждается механизм генерации ветровых волн, связанный с отрывом ветрового потока на гребне поверхностной волны, который был предложен в работе [4\*]. Выяснение механизма энергообмена ветра с крутыми и обрушающимися волнами является одним из основных вопросов, рассматриваемых в настоящей работе на основе сопоставления результатов эксперимента и предсказаний модели [3\*].

Взаимодействие поверхностных волн с турбулентным ветром приводит к нарастанию их амплитуды, которое при достижении критической крутизны приводит к их обрушению. Обрушение поверхностных волн является основным источником генерации турбулентности в верхнем слое океана. Необходимо отметить, что вопрос о генерации турбулентности в поле бегущих волн, изучен в литературе достаточно подробно, в то время как исследованию усиления вертикального обмена в поле стоячих волн уделялось значительно меньше внимания, однако такие волны часто встречаются в природных условиях. Картины волн, близкие к стоячим волнам, могут наблюдаться в зоне прибоя или

в областях усиления волн при трансформации волнения на неоднородных течениях [5\*]. Очевидцы сообщают о наблюдении стоячих волн также над очагами подводных землетрясений [6\*], [7\*]. Усилением вертикального обмена, порождаемого такими волнами, можно объяснить различные поверхностные проявления очага подводного землетрясения, такие как, появление температурных аномалий морской поверхности, изменение цвета моря и т. п. [6\*], [7\*]. Подобные поверхностные проявления могут быть зарегистрированы дистанционными методами и, предположительно, могут использоваться для обнаружения очага подводного землетрясения.

Задача об усилении вертикального обмена стоячими волнами, включает в себя два основных вопроса, первый из которых состоит в выяснении механизмов усиления перемешивания, а второй связан с исследованием процессов, приводящих к эрозии термохалинной структуры океана и, как следствие, к возникновению поверхностных проявлений этих процессов в области очага подводных землетрясений. В настоящее время в литературе обсуждается механизм усиления перемешивания и трансформации термохалинной структуры, обусловленный турбулентными пульсациями, возбуждаемыми стоячими волнами в сейсмоактивных областях [6\*]. Необходимо отметить, однако, что, несмотря на большое количество работ (см. [6\*] и ссылки в ней), посвященных наблюдениям за процессами перемешивания, до сих пор не существует количественного описания его физических механизмов. В связи с этим, в рамках настоящей работы проводилось исследование механизмов усиления перемешивания, возникающего в поле параметрических стоячих поверхностных волн, а также моделирование эрозии термохалинной структуры, вызванной таким перемешиванием.

Для экспериментального исследования полей скорости в данной работе применялся модифицированный метод цифровой оптической анемометрии, основанный на использовании скоростной видеосъемки и непрерывного освещения рабочей области вместо стробоскопического. Основным преимуществом такого метода является возможность получения статистического ансамбля мгновенных полей скорости для их последующего усреднения с целью получения средних характеристик турбулентных потоков.

**Основной целью диссертации** является лабораторное и численное моделирование взаимодействия нелинейных поверхностных волн с турбулентностью в пограничных слоях атмосферы и океана, включая изучение генерации крутых и обрушающихся бегущих поверхностных волн ветровым турбулентным пограничным слоем; экспериментальное и теоретическое исследование генерации нелинейных течений и турбулентности крутыми и обрушающимися поверхностными волнами в жидкости; моделирование эрозии термохалинной структуры океана при усилении турбулентности в верхнем перемешанном слое океана.

В соответствии с этой целью в настоящей работе решались следующие конкретные задачи:

1. Экспериментальное исследование статистических свойств воздушного потока над поверхностными волнами методом оптической цифровой анемометрии (DPiV).
2. Сопоставление результатов лабораторного моделирования с прогнозами теоретической модели турбулентного пограничного слоя над бегущими поверхностными волнами.
3. Экспериментальное исследование турбулентного перемешивания, индуцированного стоячими поверхностными волнами.
4. Моделирование различных режимов взаимодействия термохалинной структуры океана с турбулентной областью, генерируемой источниками, расположенными на дне и на поверхности океана.
5. Исследование возможности возникновения температурных аномалий поверхности в условиях взаимодействия термохалинной структуры океана с турбулентной областью, порождаемой сосредоточенными источниками в сейсмоактивной области.

**Научная обоснованность и достоверность результатов**, полученных в диссертации, обеспечивается сравнением новых экспериментальных результатов с ранее полученными данными. Работоспособность модификаций DPiV-метода, проверялась при обработке изображений известных из литературы модельных течений. Выводы диссертации обоснованы аналитическими и численными расчетами. Все программы расчетов тестировались на известных аналитических зависимостях, описанных в литературе. В ряде предельных случаев результаты диссертации совпадают с результатами, полученными ранее другими исследователями. Основы теоретических моделей, используемых в настоящей работе, опубликованы в книгах и научных журналах и применяются на сегодняшний день при исследованиях. Основные положения диссертации опубликованы в ведущих российских журналах, докладывались на российских и международных конференциях.

**Научная новизна и положения, выносимые на защиту.** Научная новизна диссертационной работы определяется полученными в ней оригинальными результатами:

1. С использованием модифицированного метода оптической цифровой анемометрии в лабораторном эксперименте показано, что в среднем по статистическому ансамблю обтекание взволнованной поверхности воды турбулентным ветровым потоком является безотрывным и хорошо описывается квазилинейной теорией взаимодействия волн и ветра в случае как линейных, так и сильнонелинейных волн.

2. На основании лабораторного эксперимента предложен механизм формирования слоя перемешанной жидкости в присутствии нелинейных стоячих поверхностных волн. Показано, что вблизи пучностей

стоячих волн, возникают течения, развитие неустойчивости которых приводит к генерации турбулентности в верхнем слое жидкости.

3. На основании лабораторного эксперимента определен закон расширения перемешанного слоя жидкости, создаваемого в присутствии стоячих поверхностных волн, который хорошо описывается полумпирической теорией турбулентности.

4. На основании полумпирической модели турбулентности дана классификация режимов эволюции локализованной турбулентной области в стратифицированной жидкости. На основании данных лабораторного эксперимента по генерации турбулентности стоячими волнами и проведенной классификации сделаны оценки времени разрушения термохалинной структуры океана турбулентностью, генерируемой в сейсмоактивной области. Продемонстрирована возможность возникновения холодной аномалии на поверхности океана в плейстосейстовой зоне подводного землетрясения.

#### **Практическая значимость.**

1. На основании лабораторных экспериментов по изучению взаимодействия ветрового потока с поверхностными волнами, проведено исследование параметров турбулентного ветрового потока над волнами, которые могут быть использованы в глобальных климатических и синоптических моделях, а также в моделях оперативного прогноза погоды и ветрового волнения

2. Механизм генерации средних течений и турбулентности в поле стоячих поверхностных волн, установленный в настоящей диссертационной работе, представляет интерес для задач, связанных с исследованием усиления вертикального обмена в океане, приводящего к эрозии термоклина в сейсмоактивных областях.

3. Результаты численного моделирования динамики турбулентной области в стратифицированной жидкости, могут быть использованы для оценок возможности появления аномалии температуры поверхности в сейсмоактивных областях.

Результаты работы использовались при выполнении проектов РФФИ (№05-05-64137, 06-05-64473, 07-05-00565а, 07-05-12011\_офия, 08-05-97011, 08-05-97013-р\_поволжье\_а, 09-05-00779а), Гранта Президента МК 1982.2009.5, гранта Ведущей научной школы НШ-6043.2006.2 им. академика В.И. Таланова, INTAS-8014, THORPEX, программ Министерства образования и науки РФ.

**Публикации и апробация результатов.** Основные результаты диссертации представлялись на Нижегородской сессии молодых ученых (Н. Новгород, 2007, 2008, 2009), на Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса (Москва, 2005, 2006), на международной конференции “Topical Problems of Nonlinear Wave Physics” (Нижний Новгород, 2005,

2008), на международной научной школе “Nonlinear Waves” (Нижний Новгород, 2006, 2008, 2010), на международных рабочих встречах “Influence of Waves on Turbulence in the Atmosphere and Ocean Boundary Layer” (Осло, 2007, 2009), на международной конференции “Fluxes and Structures in Fluids: Physics of Geospheres” (Москва, 2009), на международной конференции “Mode Conversion, Coherent Structures and Turbulence” (Москва, 2009), на международной рабочей встрече “SEASAR 2010, Advances in SAR Oceanography from ENVISAT, ERS and ESA third party missions” (Италия, 2010), докладывались на семинарах ИПФ РАН и опубликованы в журналах “Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана”(4 статьи), Доклады Академии Наук (1 статья), препринтах ИПФ РАН (5 препринтов). Результаты диссертации опубликованы в 26 печатных работах.

**Личный вклад автора.** Все приведенные в диссертации результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор принимала участие в проведении экспериментов по моделированию турбулентных течений в пограничных слоях атмосферы и океана, а также проводила обработку экспериментальных данных. Автору принадлежит численная реализация уравнений полуэмпирической теории турбулентности и построение теоретических моделей средних течений, возбуждаемых стоячими поверхностными волнами.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы 187 страниц, включая 87 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 201 наименования.

### Краткое содержание диссертации

**Во введении** освещается современное состояние рассматриваемых в диссертации проблем, обосновывается актуальность темы работы и ее практическая значимость, кратко излагается ее содержание, формулируются положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен литературный обзор работ, посвященных исследованию различных процессов взаимодействия поверхностных волн с пограничными слоями океана и атмосферы.

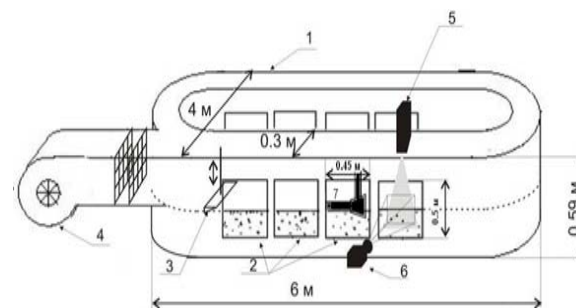
В §1.2 приведен литературный обзор экспериментальных исследований, в том числе контактных, акустических и оптических измерений параметров бегущих обрушающихся волн, а также теоретических и численных моделей, описывающих процессы обрушения.

В §1.3 обсуждаются экспериментальные и теоретические исследования процесса затухания поверхностных волн на мелкомасштабной турбулентности. Описаны два возможных механизма затухания волн, основанных на рассеянии поверхностных волн на турбулентных вихрях и на затухании волн за счет вихревой вязкости, возникающей из-за наличия турбулентности.

В §1.4 приведен обзор работ по исследованию процессов генерации поверхностных волн турбулентным ветровым потоком. В §1.4 приводится описание результатов различных численных моделей воздушного пограничного слоя над взволнованной водной поверхностью и обзор результатов экспериментальных исследований турбулентного воздушного потока над волнами, проводимых контактными методами, с помощью визуализации дымом и мелкими частицами, а также с помощью современной экспериментальной техники Digital Particle Image Velocimetry (DPIV) [8\*].

**Во второй главе** обсуждаются результаты экспериментального исследования параметров турбулентного ветрового пограничного слоя над взволнованной водной поверхностью.

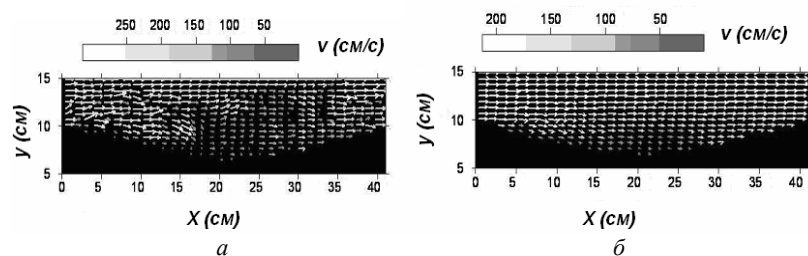
В §2.2 изложен экспериментальный метод исследования аэродинамических полей над поверхностными волнами, основанный на получении мгновенных полей скорости ветра и на их последующем статистическом усреднении. Эксперименты по исследованию турбулентного ветрового потока над взволнованной водной поверхностью проводились в кольцевом ветро-волновом бассейне ИПФ РАН (рис. 1). Воздушный поток над водной поверхностью создавался вентилятором. Поверхностные волны генерировались с помощью программируемого волнопродуктора, совершавшего колебания в вертикальной плоскости. Для проведения измерений мгновенных полей скорости в воздушный поток с помощью специального устройства вместе со сжатым воздухом инжестировались сферические частицы полистирола. Рабочая область освещалась непрерывным излучением лазера, преобразованным системой линз в световой нож. Изображение освещенных частиц снималось на цифровую скоростную CCD-камеру. В ходе обработки с помощью DPIV-алгоритма были получены мгновенные поля скорости ветрового потока над поверхностными волнами (рис. 2, а).



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – ветровой бассейн (длина 16 м, ширина 0.3 м, глубина воды 32 см), 2 – прямоугольные иллюминаторы 45×50 см, 3 – волнопродуктор (частота 2.5 Гц, амплитуды 6.5, 14, 20 мм), 4 – вентилятор (4 м/с на

оси), 5 – лазер непрерывного излучения Nd:Yag LCS-DTL-318-500 ( $\lambda=532$  нм, мощность излучения 500 мВт), 6 – скоростная видеокамера “Видеоскан” VS-

FAST (1000 кадров/с, 1280×500 пикселей), 7 – устройство впрыска частиц в ветровой поток.



**Рис. 2.** Иллюстрация отрыва пограничного слоя на мгновенном поле скорости (а); осредненное по турбулентным пульсациям поле скорости (б);  $x=\lambda-ct$ ,  $c$ ,  $\lambda$  – фазовая скорость и длина волны. Скорость ветра на оси канала 4 м/с, амплитуда волны 16.61 мм,  $\lambda=40.9$  см,  $c=102.3$  см/с.

В §2.3 приведено описание особенностей обработки экспериментальных данных, основанной на процедуре осреднения временных рядов скорости воздушного потока, возвышения и уклона поверхности, полученных в точках, соответствующих фиксированному разгону, на основе обработки с помощью алгоритма DPIV. Полученные в результате описанной процедуры средние поля скорости оказались достаточно гладкими (рис. 2, б) по сравнению с мгновенными полями скорости (рис. 2, а). В §2.3 также приведено описание алгоритма получения полей давления из ансамбля турбулентных полей скорости, основанного на анализе интегральных уравнений, аналогичных уравнениям, предложенным в работе [9\*] для случая ламинарного потока. В линейном приближении для гармонической волны  $q_-(x^*, y^*, t^*) = \hat{q}(y^*)e^{-i(\omega t^* - kx^*)}$  уравнение для  $y$ -компоненты импульса может быть преобразовано к виду

$$ik(U-c)\hat{v} + \frac{\partial(\hat{p} - \hat{\sigma}_{22})}{\partial y^*} = ik\hat{\sigma}_{12} - \frac{\partial \Sigma_{12}}{\partial y^*} ik\hat{\eta}, \quad (1)$$

и величина  $P_a = \hat{p} - \hat{\sigma}_{22}$  может быть найдена с помощью интегрирования уравнения (1) по координате  $y^*$ :

$$P_a|_{y^*}^H = ik \int_{y^*}^H (\hat{\sigma}_{12} - (U-c)\hat{v}) dy' + (\Sigma_{12}(y^*) - \Sigma_{12}(H)) ik\hat{\eta}. \quad (2)$$

В формуле (2) использованы координаты  $y^* = y - \eta(x, t)$ ,  $x^* = x$ ,  $t^* = t$  ( $\eta(x, t)$  – возвышение поверхности), предложенные в [10\*]. Данный метод расчета волновых возмущений давления по полям скорости является обобщением интегральных соотношений, предложенных в [9\*] для ламинарного потока. В данной работе показано, что предло-

женный метод позволяет обнаружить слабую зависимость инкремента поверхностных волн от их крутизны.

В §2.4 приведены параметры поверхностных волн, полученные с помощью описанной процедуры осреднения. Показано, что для случая обрушающихся волн наблюдается явление возрастания длины волны и фазовой скорости волны. Выдвинута гипотеза, что такой эффект связан с влиянием дрейфового течения, усиливающегося в случае обрушения волны. С помощью метода оптической цифровой анемометрии (DPIV-метода) была измерена скорость дрейфового течения, генерируемого при обрушении.

В §2.5 представлены осредненные по ансамблю скорости воздушного потока над волнами. Показано, что векторные поля скорости воздушного потока, осредненные по статистическому ансамблю, оказываются безотрывными. С помощью статистического ансамбля реализаций турбулентного воздушного потока над гармонической волной с частотой  $\omega$ , волновым числом  $k$  и амплитудой  $a$ , был найден поток энергии от ветра к волне и сделаны оценки ее инкремента, который

определяется из уравнения баланса энергии:  $\frac{dE}{dt} = \Pi|_{y^*=0}$ , где

$E = \rho_w \omega^2 a^2 / (2k)$  – плотность энергии поверхностных волн. Наибольший вклад в поток энергии дает компонента нормального напряжения  $P_a$  в фазе с уклоном поверхности [11\*], тогда инкремент:

$$\text{Im } \omega = \frac{1}{2} \frac{u_*^2}{c^2} \omega \beta \frac{P_a}{\rho_w}, \quad (3)$$

где  $\beta = 2 \langle P_a \eta_x \rangle / u_*^2 (ka)^2$  – параметр взаимодействия ветра и волн.

Квазилинейная модель турбулентного ветра над взволнованной поверхностью, предложенная в работе [3\*], основанная на решении системы уравнений Рейнольдса с учетом гипотезы замыкания первого порядка, описана в §2.6. В рамках этой модели предполагается, что взаимодействие ветра и волн происходит в квазилинейном приближении, то есть возмущения, индуцированные волной в воздушном потоке, описываются в линейном приближении. При этом осредненный воздушный поток над волнами предполагается безотрывным. Описание средних полей в потоке над крутыми и обрушающимися волнами, при наличии эффекта отрыва на мгновенных снимках потока, может проводиться в рамках безотрывной квазилинейной теории в связи с тем, что полученные в результате экспериментальных исследований средние по статистическому ансамблю поля скорости являются безотрывными.

Сравнение данных проведенных экспериментов и результатов вычислений, в рамках квазилинейной модели представлено в §2.7. Полученные в ходе обработки экспериментальных данных осредненные величины скорости, турбулентные напряжения, амплитуды и фазы

компонент скорости, индуцированных волной, а также зависимости параметра взаимодействия ветра и волн  $\beta$  от крутизны поверхностных волн удовлетворительно согласуются с модельными расчетами, в рамках предложенной квазилинейной модели (рис. 3, 4).

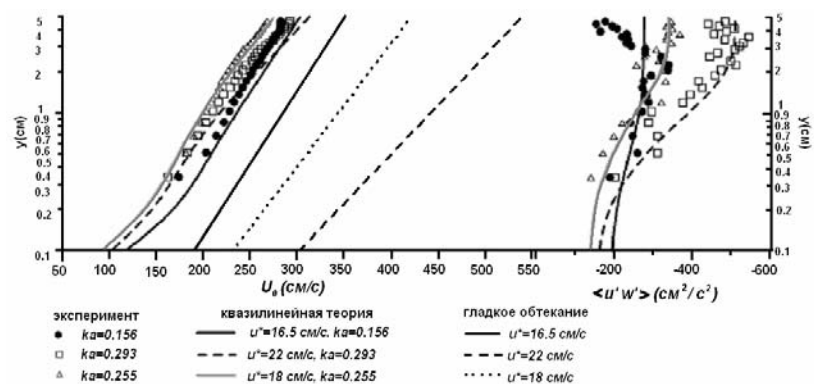


Рис. 3. Сравнение теории и эксперимента – профили средней горизонтальной скорости ветра ( $U_0$ ) и турбулентных напряжений ( $\langle u'w' \rangle$ ),  $U^*$  – скорость трения ветра,  $ka$  – крутизна волны.

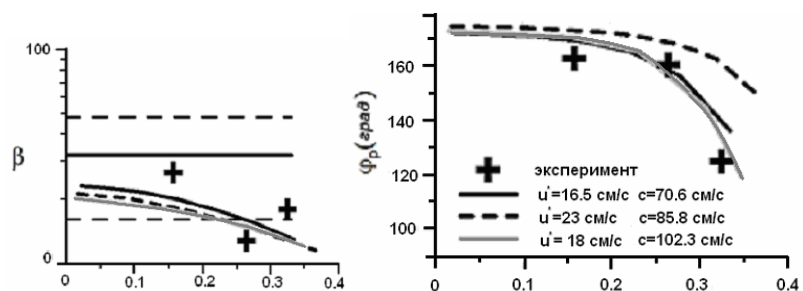


Рис. 4. Сравнение теории и эксперимента: зависимость  $\beta$  и фазового сдвига волновых возмущений давления.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию средних течений, генерируемых в поле стоячих параметрических гравитационно-капиллярных волн. Показано, что процесс перемешивания, инициированного стоячими поверхностными волнами в жидкости, может быть разделен на два этапа. Первый этап связан с генерацией средних течений в пучностях стоячих поверхностных волн [12\*], [13\*] (рис. 5, а). Необходимо отметить, что немного позднее исследований, представленных в данной диссертационной работе, экспериментальное изучение эффекта генерации средних течений в поле стоячих поверх-

ностных волн было независимо проведено авторами в [14\*]. Второй этап перемешивания, генерируемого стоячими поверхностными волнами, обусловлен развитием неустойчивости средних течений и образованием турбулентности (рис. 5, б). Процедура визуализации различных этапов перемешивания, с помощью подкрашивания верхнего слоя жидкости описана в §3.1.

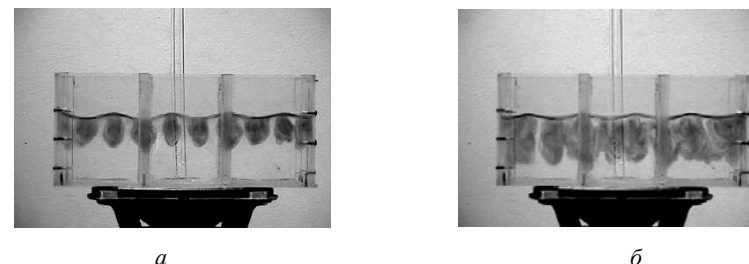


Рис. 5. Образование системы циркуляционных течений в пучностях стоячих волн (частота волн 5.4 Гц, крутизна волн 0.4)  $t=5$  с (а); образование перемешанной области  $t=20$  с (б).

Установка для проведения экспериментов по изучению перемешивания, инициированного поверхностными параметрическими волнами, включала в себя вибростенд и прямоугольную кювету, заполненную соленой водой (плотностью  $1.002 \text{ г/см}^3$ ). Кювета устанавливалась на вибростенд (рис. 6), сигнал на который подавался с низкочастотного генератора; при достижении некоторого критического значения амплитуды колебаний вибростенда, в кювете возбуждались гравитационно-капиллярные волны с частотой, равной половине частоты вибраций. Визуализация течений в жидкости производилась по наблюдениям размытия тонкого подкрашенного чернилами поверхностного слоя.

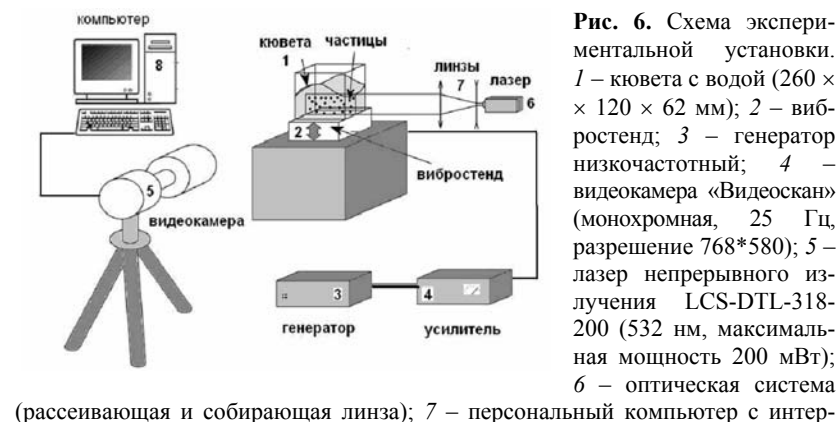
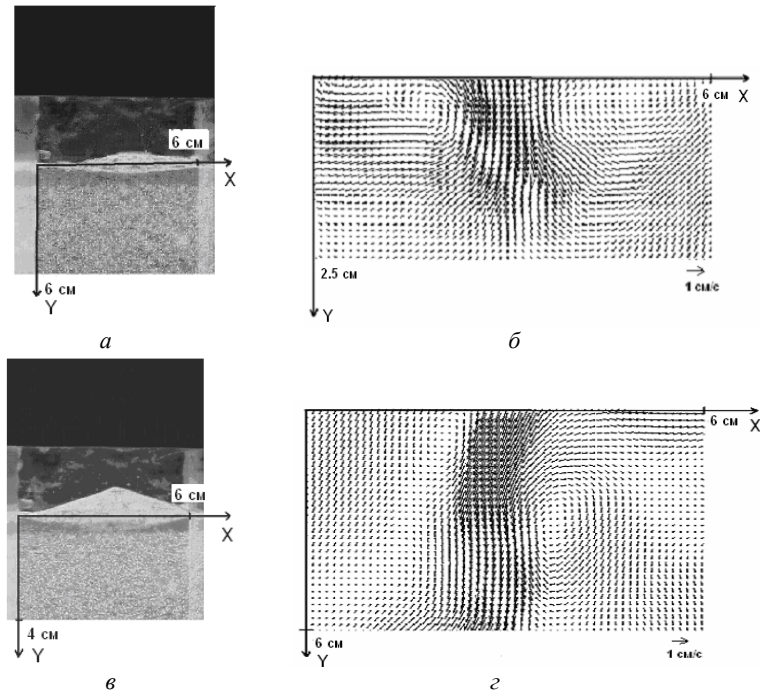


Рис. 6. Схема экспериментальной установки. 1 – кювета с водой ( $260 \times 120 \times 62 \text{ мм}$ ); 2 – вибростенд; 3 – генератор низкочастотный; 4 – видеокамера «Видеоскан» (монокромная, 25 Гц, разрешение  $768 \times 580$ ); 5 – лазер непрерывного излучения LCS-DTL-318-200 (532 нм, максимальная мощность 200 мВт); 6 – оптическая система (рассеивающая и собирающая линза); 7 – персональный компьютер с интер-

фейсом для видеокамеры;  $\delta$  – частицы для визуализации движений жидкости,  $d=20$  мкм.

В §3.2 описана методика измерения поля скорости течения в плоскости перпендикулярной гребню стоячих волн, основанная на использовании метода DPIV [8\*] (см. рис. 6).

В §3.3 получен вид картины поля скорости для средних течений, возбуждаемых волнами, имеющими различные амплитуды (рис. 7). Исследована зависимость скорости нелинейных течений от амплитуды поверхностных волн.



**Рис. 7.** Картина возвышения поверхности для случая слабонелинейных волн с амплитудой возвышения  $a=0.38$  см (*a*) и нелинейных волн  $a=0.6$  см (*в*); картина поля скорости, амплитуды возвышения:  $a=0.38$  см (*б*),  $a=0.6$  см (*г*).

В §3.4 проведены оценки величин скоростей средних течений, генерируемых в поле стоячих волн в вязкой жидкости с чистой поверхностью и с поверхностью покрытой пленками поверхностно-активных веществ (ПАВ), основанные на предположении о генерации средних течений за счет действия вязких напряжений в тонком вязком пограничном слое.

Необходимо отметить, что генерация средних течений поверхностными волнами происходит более эффективно в случае наличия на по-

верхности пленок ПАВ по сравнению со случаем чистой поверхности. Это связано с увеличением вязких напряжений вблизи поверхности воды, обусловленных граничными условиями равенства нулю касательной компоненты скорости на поверхности воды, покрытой пленкой.

Оценки показывают, что отношение характерных величин средних скоростей в жидкости в случае отсутствия и наличия пленки определяется отношением толщины пограничного слоя к длине волны:

$$\frac{\langle v \rangle}{\langle v \rangle_{нп}} \propto k \sqrt{\frac{\nu}{\omega}} \ll 1. \quad (4)$$

Здесь  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости,  $k$  и  $\omega$  – соответственно волновое число и частота поверхностной волны. Для интерпретации зависимостей, полученных в §3.4, предложена простая качественная модель возникновения среднего поля скорости в потенциальных нелинейных волнах. В рамках данной модели предполагается, что движение жидкости вблизи пучности волны аналогично течению внутри угла, угол раствора которого в два раза меньше угла при вершине волны. А поскольку угол при вершине волны во впадине не равен углу при вершине волны на гребне, средняя за период скорость течения жидкости внутри угла оказывается отличной от нуля. Таким образом, средние течения имеют вид кумулятивных струй, исходящих из пучности стоячих волн. При этом предполагается, что скорость таких средних течений линейно зависит от амплитуды, поскольку характерная величина скорости в поверхностной волне имеет величину  $c(ka)$ .

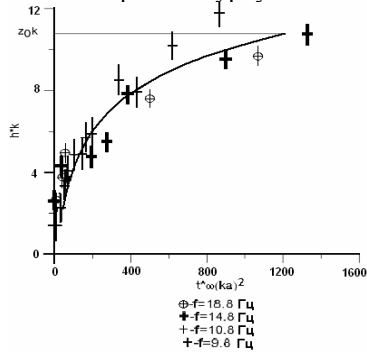
**В четвертой главе** обсуждаются результаты лабораторного моделирования генерации турбулентности стоячими поверхностными волнами, а также численные расчеты динамики турбулентной области, генерируемой источником на поверхности и на дне в однородной и стратифицированной жидкости.

В §4.1 представлены результаты экспериментального исследования динамики турбулентности, генерируемой в результате развития неустойчивости средних течений, возбуждаемых на первом этапе возникновения перемешивания инициированного в поле стоячих поверхностных волн в однородной жидкости. В ходе экспериментального исследования было обнаружено, что турбулентная область, образующаяся в поле стоячих поверхностных волн, ограничена резким фронтом, скорость которого меняется со временем (рис. 8).

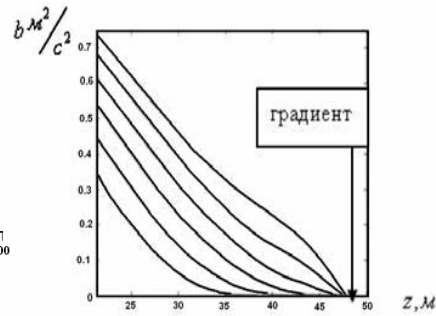
В §4.2 приводятся основные уравнения полуэмпирической теории турбулентности, описывающие динамику турбулентных слоев в однородной и стратифицированной жидкости [15\*].

Результаты численного моделирования различных режимов динамики турбулентной области в однородной и стратифицированной жидкости, возбуждаемой сосредоточенным источником на поверхности или на дне океана, представлены в §4.3. При этом рассматриваются следующие качественно различные случаи: автомодельное решение в отсутствие сдвигового течения и возмущение, вносимое появлением сдви-

гового течения в однородной жидкости, а также режимы прохождения и “запирания” турбулентности в области градиента плотности [16\*],



**Рис. 8.** Нормированные кривые зависимости размера области, охваченной турбулентностью от времени для волн различных частот и амплитуд. Сплошной линией изображена теоретическая зависимость безразмерной глубины турбулизованной области от безразмерного времени.  $z_0$  – стационарное значение толщины области, охваченной турбулентностью.



**Рис. 9.** Режим остановки турбулентности на градиенте плотности. Профили турбулентной энергии в различные моменты времени  $t=40, 50, 60, 70, 80, 90$  с, поток турбулентной энергии  $q=1 \text{ м}^3/\text{с}^3$ , глубина залегания термоклина (расстояние отсчитывается от дна) составляло 48 м, а перепад температур в области термоклина  $25 - 4 \text{ }^\circ\text{C}$ , толщина термоклина 7 м.

[17\*] (рис. 9, 10). Для расчетов динамики турбулентности в стратифицированной жидкости начальный профиль плотности выбирался в виде скачка, а масштаб турбулентности принимался в виде:

$$L = \alpha q^{\frac{1}{3}} t \cdot \frac{1 + \frac{N}{\sqrt{b}} \cdot \left( \alpha q^{\frac{1}{3}} t \right)}{1 + \left( \frac{N}{\sqrt{b}} \right)^2 \cdot \left( \alpha q^{\frac{1}{3}} t \right)^2} \quad (5)$$

Для описания различных режимов динамики турбулентности были введены турбулентное и глобальное числа Ричардсона, по аналогии с безразмерными параметрами, представленными в работах [16\*], [17\*]:

$$Ri_{turb} = \varepsilon_\rho \frac{N^2 A^2}{u_0^2}, \quad Ri_{glob} = \frac{N^2}{(\partial U / \partial z)_0^2}, \quad (6)$$

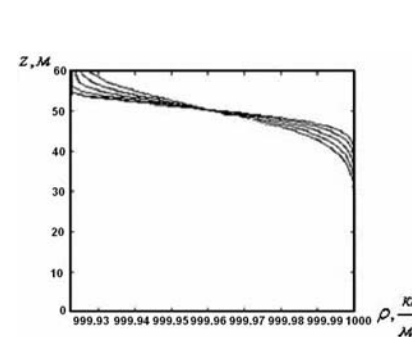
здесь  $N$  – частота Брента – Вайсяля,  $u_0$  – характерная величина пульсационной скорости,  $(\partial U / \partial z)_0$  – характерная величина сдвига скорости,  $A$  – характерный пространственный масштаб задачи.

В §4.4 приведены результаты численного моделирования динамики турбулентности, генерируемой стоячими поверхностными волнами в однородной жидкости. Принята модель постоянного внешнего масштаба турбулентности, пропорционального длине поверхностных волн.

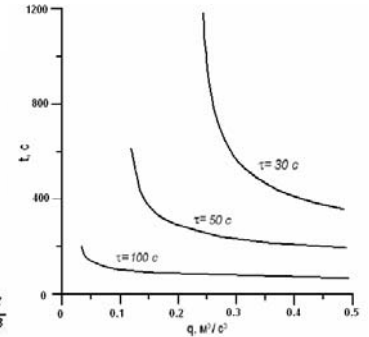
В §4.4 получено простое выражение для величины потока турбулентной энергии, генерируемой параметрическими поверхностными волнами в сейсмоактивной области, на основании сравнения зависимости крутизны поверхностных волн от ускорения дна, полученной с помощью решения уравнения Гинзбурга – Ландау, с зависимостью величины потока турбулентности от крутизны поверхностных волн, полученной в ходе экспериментальных исследований динамики турбулентной области, генерируемой стоячими поверхностными волнами:

$$q = (0.031 \pm 0.018) \cdot (\eta_0 g)^{\frac{3}{2}}, \quad (7)$$

здесь  $\eta_0$  – смещение дна при подводном землетрясении. Также в §4.4 проведен расчет времени разрушения термической структуры океана за счет турбулентных флуктуаций (рис. 11).



**Рис. 10.** Разрушение пикноклина под действием турбулентности. Профили плотности в моменты времени  $t=40, 50, 60, 70, 80$  с, поток турбулентной энергии  $q=1 \text{ м}^3/\text{с}^3$ .



**Рис. 11.** Зависимость времени понижения температуры на  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  от потока турбулентности для случая времени действия источника  $\tau=30, 50, 100$  с, глубина залегания термоклина (расстояние отсчитывается от дна) составляло 48 м, а перепад температур в области термоклина  $25 - 4 \text{ }^\circ\text{C}$ , толщина термоклина 7 м.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

## Основные результаты работы

1. В условиях лабораторного эксперимента с использованием модифицированного метода оптической цифровой анемометрии, полученные поля скорости воздушного потока над волнами, осредненные по турбулентным пульсациям. По измеренным полям скорости определены профили скорости ветра, скорости возмущений, индуцированных в воздушном потоке поверхностными волнами, а также профили турбулентных напряжений.

2. На основании сопоставления экспериментальных данных с расчетами в рамках полуэмпирической квазилинейной модели турбулентного ветрового потока над волнами, показано, что при умеренной скорости ветра для описания осредненных по ансамблю аэродинамических полей в ветровом потоке применима безотрывная квазилинейная теория, в том числе и в случае крутых и обрушающихся волн.

3. В условиях лабораторного эксперимента обнаружено, что стоячие волны на поверхности жидкости, приводят к возникновению системы течений. Показано, что для волн малой амплитуды данные течения могут быть описаны как результат действия вязких напряжений в тонком пограничном слое, в случае сильнонелинейных волн такие течения связываются с возникновением струи вблизи гребня стоячей волны.

4. Экспериментально получено, что развитие неустойчивости течений, возбуждаемых стоячими волнами, приводит к образованию заглубляющегося со временем турбулентного слоя. На основе результатов лабораторного эксперимента и численного моделирования динамики турбулентного слоя установлено соотношение между потоком турбулентной энергии и амплитудой волн. Показано, что генерация стоячих поверхностных волн при подводном землетрясении может приводить к возникновению холодной аномалии в распределении температуры поверхности океана.

5. На основе численного решения уравнений полуэмпирической теории турбулентности исследована динамика турбулентного слоя, возбуждаемого источником на дне или на поверхности в однородной и стратифицированной жидкости. Показано существование различных режимов турбулентной диффузии, в том числе режимов остановки турбулентного слоя в области термоклина и эрозии термохалинной структуры под действием турбулентных пульсаций.

#### Список цитированной литературы

1. Al-Zanaidi M.A., Hui W.H. Turbulent airflow over water waves – a numerical study // *J. Fluid Mech.* 1984. V. 148. p. 225–246.
2. Jenkins A.D. Quasi-linear eddy-viscosity model for the flux of energy and momentum to wind waves using conservation-law equations in a curvilinear coordinate system // *J. Phys. Oceanogr.* 1992. V. 22. p. 843–858.
3. Реутов В.П., Троицкая Ю.И. О нелинейных эффектах при взаимодействии волн на воде с турбулентным ветром // *Изв. РАН. ФАО.* 1995. Т. 31. № 6. С. 825–834.
4. Jeffreys H. On the formation of waves by wind // *Proc. Roy. Soc.* 1924. V. 107A. p. 189–206.
5. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. Л.: Гидрометеоздат, 1985. – 375 с.
6. Левин Б.В., Носов М.А. Физика цунами и родственных явлений в океане. М.: Янус-К, 2005. С. 360.
7. Левин Б.В. Цунами и моретрясение в океане // *Природа.* 1996. № 5. С. 48–61.
8. Adrian R.J. Particle Imaging techniques for experimental fluid mechanics // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1991. V. 23. p. 261–304.

9. Hsu C.T., Hsu E.Y., Street R.L. On the structure of turbulent flow over a progressive water wave: theory and experiment in a transformed, wave-following co-ordinate system // *J. Fluid Mech.* 1981. V. 105. p. 87–117.

10. Benjamin Brooke T. Shearing flow over a wavy boundary // *J. Fluid Mech.* 1959. V. 6. p. 161–205.

11. Donelan M.A. Air-sea interaction // in *The Sea*, V. 9, Ocean Engineering Science, edited by B. LeMehaute and D. M. Hanes. 1990. p. 239–292.

12. Longuet-Higgins M.S. Mass transport in water waves // *Phil. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A.* 1953. V. 245. № 903. P.535–585.

13. Dore B.D. Double boundary layers in standing surface waves // *Pageoph.* V. 114. 1976. p. 629–637.

14. Калинин В.А., Секерж-Зенькович С.Я. Экспериментальное исследование вторичных стационарных течений в поверхностных волнах Фарадея // *Изв. РАН МЖГ.* 2008. № 1. С. 141–148.

15. Баренблатт Г.И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Теория и приложения к геофизической гидродинамике. – Л.: Гидрометеоздат, 1978, С.190.

16. Turner J.S. The influence of molecular diffusivity on turbulent entrainment across a density interface // *J. Fluid Mech.* 1968. V. 33. p. 639–656.

17. Зацепин А.Г., Крылов А.Д. Внутриводное теплообразование вследствие дифференциального обмена теплом и солью через границу раздела между турбулентными слоями // *Океанология.* 1992. № 32. Вып.1. С.60–67.

#### Список публикаций по теме диссертации

1. Ермакова О.С., Ермаков С.А., Троицкая Ю.И. Лабораторное исследование динамики слоя турбулентности, возбуждаемой стоячими поверхностными волнами в жидкости // *Изв. РАН. ФАО.* 2007. Т. 43. № 1. С. 1–11.
2. Ермакова О.С., Капустин И.А., Папко В.В. О динамике турбулентного слоя в однородной и стратифицированной жидкости // *Изв. РАН. ФАО.* 2008. Т. 44. № 5. С. 629–640.
3. Ермакова О.С., Ермаков С.А., Мальков Ю.А., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Исследование нелинейных течений, возбуждаемых стоячими поверхностными волнами в жидкости: лабораторный эксперимент // *Изв. РАН. ФАО.* 2009. Т. 45. № 6. С. 846–853.
4. Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А., Ермакова О.С., Баландина Г.Н. Тонкая структура турбулентного пограничного слоя атмосферы над водной поверхностью // *Изв. РАН. ФАО.* 2010. Т. 46. № 1. С. 119–130.
5. Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А., Ермакова О.С., Баландина Г.Н. Статистические свойства турбулентного пограничного слоя атмосферы над крутыми поверхностными волнами // *ДАН.* 2010. Вып. 433. № 1, (принято к печати).
6. Ермакова О.С., Ермаков С.А., Троицкая Ю.И. Турбулентная диффузия в стратифицированной жидкости со сдвиговым течением // В Тр. (восьмой) научной конференции по радиофизике, посвященной 80-летию со дня рождения Б. Н. Гершмана», ННГУ, Нижний Новгород, 2004. С. 176–177.
7. Ермакова О.С., Ермаков С.А., Капустин И.А., Троицкая Ю.И. Лабораторное исследование движения фронта турбулентной области в однородной жидкости // В Тр. (Девятой) Научной конференции по радиофизике «Факультет – ровесник Победы», ННГУ, Нижний Новгород, 2005. С. 255–256.
8. Ермакова О.С., Ермаков С.А., Троицкая Ю.И. Генерация турбулентности стоячими поверхностными волнами в слабостратифицированной жидкости // В Тр. 11 Нижегородской сессии молодых ученых (Естественнонаучные дисциплины), Нижний Новгород, 2006. С. 81–82.
9. Ермакова О.С., Ермаков С.А., Капустин И.А., Троицкая Ю.И. Исследование динамики плоского турбулентного слоя в однородной жидкости // В Тр. X научной конференции по радиофизике, посвященной 90-летию ННГУ и 100-летию со дня рождения Г. С. Горелика, ННГУ, Нижний Новгород, 2006. С. 33–34.

10. Ермакова О.С., Ермаков С.А., Мальков Ю.А., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Исследование средних течений, генерируемых стоячими поверхностными волнами, с помощью PIV метода // В Тр. 12 Нижегородской сессии молодых ученых (Естественнонаучные дисциплины), Нижний Новгород, 2007. С. 92.

11. Ермакова О.С., Ермаков С.А., Мальков Ю.А., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Применение PIV метода для исследования перемешивания, индуцированного стоячими поверхностными волнами в жидкости // В Тр. XI научной конференции по радиофизике, посвященной 105-й годовщине со дня рождения М.Т.Греховой, ННГУ, Нижний Новгород, 2007. С. 165–167.

12. Ермакова О.С., Мальков Ю.А., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Исследование механизмов перемешивания, инициированного стоячими поверхностными волнами в жидкости // В Тр. 13 Нижегородской сессии молодых ученых (Естественнонаучные дисциплины), Нижний Новгород, 2008. С. 102–103.

13. Ермакова О.С., Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А., Баландина Г.Н. Исследование турбулентного пограничного слоя над волнами // В Тр. 14 Нижегородской сессии молодых ученых (Естественнонаучные дисциплины), Нижний Новгород, 2009. С. 34–35.

14. Ermakova O.S., Troitskaya Yu.I., Sergeev D.A., Balandina G.N. Investigation of the wind structure above wavy water surface // Proceedings of International Conference "Mode Conversion, Coherent Structures and Turbulence" (MSS-09), Moscow, Space Research Institute of RAS, 23 – 25 November, 2009. p. 456–461.

15. Ermakova O.S., Ermakov S.A., Troitskaya Yu.I. Turbulence generation by surface parametrical waves. Proc. Int. Conf. "Nonlinear Wave Processes" (St Petersburg-Nizhny Novgorod, August, 2005), section NWP–3, 2005. p. 32–33.

16. Ermakova O.S., Troitskaya Yu.I. Dynamics of a turbulent front in a stratified fluid. Proc. Int. Conf. "Nonlinear Wave Processes" (St Petersburg-Nizhny Novgorod, August, 2005), section NWP–3, 2005. p. 34–35.

17. Ермакова О.С., Ермаков С.А., Троицкая Ю.И. Лабораторное исследование динамики слоя турбулентности, возбуждаемой стоячими гравитационно-капиллярными волнами в жидкости // В сборнике тезисов докладов конференции молодых ученых XIII Всероссийской научной школы «Нелинейные волны- 2006» Н. Новгород: ИПФ РАН, 2006. С. 50–51.

18. Ермакова О.С., Ермаков С.А., Мальков Ю.А., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Исследование детектированных течений, индуцированных стоячими поверхностными волнами в жидкости // В сборнике тезисов докладов конференции молодых ученых XI Всероссийской научной школы «Нелинейные волны- 2008» Н.Новгород: ИПФ РАН, 2008. С. 50–51.

19. Ermakova O.S., Malkov Yu.A., Sergeev D.A., Troitskaya Yu.I. On the generation of the vertical mixing due to surface waves. Proc. Int. Conf. "Nonlinear Wave Processes", section NWP–2, 2008. p. 30–31.

20. Ermakova O.S., Sergeev D.A., Troitskaya Yu.I., Balandina G.N. Turbulent boundary layer above wavy water surface // Abstracts of International conference " Fluxes and Structures in Fluids: Physics of Geospheres, 15-th session, MSU, 24–27 June, 2009. p. 69–71.

21. Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А., Ермакова О.С., Баландина Г.Н. Исследование структуры турбулентного ветрового потока над поверхностными волнами // В сборнике тезисов докладов конференции молодых ученых XII Всероссийской научной школы «Нелинейные волны – 2010» Н.Новгород: ИПФ РАН, 2010. С. 35–36.

22. Ермакова О.С., Ермаков С.А., Троицкая Ю.И. Лабораторное исследование динамики слоя турбулентности, возбуждаемой стоячими поверхностными волнами в жидкости: препринт № 687, ИПФ РАН. – Н. Новгород, 2005. – 22 с.

23. Ермакова О.С., Капустин И.А., Папко В.В. О динамике турбулентного слоя в однородной и стратифицированной жидкости: препринт № 740, ИПФ РАН. – Н. Новгород, 2008. – 20 с.

24. Ермакова О.С., Ермаков С.А., Мальков Ю.А., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Исследование нелинейных течений, возбуждаемых стоячими поверхностными волнами в жидкости: лабораторный эксперимент: препринт № 766, ИПФ РАН. – Н. Новгород, 2008. – 16 с.

25. Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А., Ермакова О.С., Баландина Г.Н. Тонкая структура турбулентного пограничного слоя атмосферы над водной поверхностью: препринт № 776, ИПФ РАН. – Н. Новгород, 2008. – 16 с.

26. Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А., Ермакова О.С., Баландина Г.Н. Статистические характеристики турбулентного пограничного слоя атмосферы над взволнованной поверхностью воды: препринт № 790, ИПФ РАН. – Н. Новгород, 2010. – 41с.

Ольга Станиславовна Ермакова

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
НЕЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН  
С ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ В ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЯХ  
АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати - 18.05.2010 г.  
Формат  $60 \times 90 \frac{1}{16}$ . Бумага офсетная № 1.  
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № 56(2010)

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,  
603950 Н. Новгород, ул. Ульянова, 46