

*На правах рукописи*

Байдаков Георгий Алексеевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ВЕТРОВОГО ПОТОКА И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН  
НА КОРОТКИХ РАЗГОНАХ**

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 – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (г. Нижний Новгород)

### **Научный руководитель**

Троицкая Юлия Игоревна, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН)

### **Официальные оппоненты**

Репина Ирина Анатольевна, доктор физико-математических наук, профессор РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук» (ИФА РАН);

Ивонин Дмитрий Валерьевич, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт океанологии им. П.П.Ширшова Российской академии наук» (ИО РАН)

### **Ведущая организация**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (МГУ)

Защита диссертации состоится «29» июня 2016 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.01 в ИПФ РАН по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН и на официальном сайте ИПФ РАН <http://www.ipfran.ru/training/img/2016/Baidakov.pdf>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

А.И. Малеханов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Процессы турбулентного обмена в океане и атмосфере оказывают существенное влияние на климатическую систему Земли. Хотя эти мелкомасштабные динамические процессы не разрешаются современными численными моделями погоды и климата моделей, но они учитываются посредством параметризации с помощью "балк-формул" для аэродинамического сопротивления и теплообмена на границе раздела воды и воздуха. В случае взаимодействия атмосферы и гидросферы важную часть таких параметризаций составляет описание влияния поверхностного волнения на турбулентный обмен.

Моделирование поверхностного волнения также представляет собой важную прикладную задачу, интерес к которой, прежде всего, обусловлен вопросами безопасности морской деятельности. Для прогнозирования волнения разработан ряд численных моделей, таких как WAVEWATCH III [1], WAM [2], SWAN [3], которые хорошо описывают эволюцию полного двумерного спектра волн под влиянием ветроволнового взаимодействия, диссипации, четырехволнового взаимодействия, а в случае мелкой воды – также трение о дно, трехволновое взаимодействие и обусловленные глубиной обрушения. Эти модели изначально создавались для прогноза океанских волн, однако, в последнее время большой интерес вызывает и прогноз волнения на внутренних водоемах, связанный, прежде всего, с задачами защиты берегов и безопасности речного судоходства. Помимо этого, плохо изучено влияние волнения на процессы обмена импульсом, теплом и влагой над водоемом, которые определяют микроклимат прилегающих территорий, часто представляющих собой рекреационные зоны. Волнение на внутренних водоемах имеет особенности, обусловленные короткими разгонами, для которых характерны большие крутизны волн, а значит, и сравнительно сильная нелинейность.

Следует также отметить, что изучение крутых коротких волн представляет большой интерес и для случая больших разгонов, поскольку обмен импульсом, теплом, массой, энергией и т.д. в основном определяется коротковолновой частью спектра ветровых волн. В частности, работы [4,5] подтверждают, что около 70-80% поверхностного напряжения ветра определяется волнами с волновым числом  $k > 9k_p$  ( $k_p$  – волновое число, соответствующее пику спектра) и около 80% шероховатости поверхности определяется волн с длиной волны менее 3 м [6–9]. Многочисленные инструментальные и визуальные наблюдения показывают, что эти короткие волны – крутые, поэтому поверхностные напряжения ветра определяются чрезвычайно сложными нелинейными явлениями в турбулентном потоке воздуха над крутыми элементами шероховатой поверхности (такими как экранирование, разделение потока и т.д.) Эти явления были исследованы с помощью контактных методов и методов визуализации дымом в лабораторных экспериментах [10–15]. Основ-

ные трудности в проведении этих экспериментов, заключаются в измерении воздушного потока близко к поверхности воды, особенно во впадинах волн. Эти измерения могут быть выполнены с использованием отслеживающих форму волны контактных датчиков [14–16]. Также проблема измерения ветра ниже уровня гребней волн была решена в [12,13] с помощью засева потока малыми частицами визуализированных импульсным источником света и применения специальной техники фотографии. Эксперименты [12,13] продемонстрировали появление такого сильно-нелинейного явления, как отрыв воздушного потока на гребнях крутых волн.

В последнее время структура воздушного потока над волнами была подробно исследована методом анемометрии по изображениям частиц (метод PIV) [17], который заключается в засеивании потока малыми частицами, освещаемыми лазерным светом и регистрирующимися при помощи цифрового фотоаппарата. Применение этого метода также продемонстрировало [18–20] проявление отрыва воздушного потока на гребнях волн и его последующего присоединения на наветренном склоне волны на изображениях мгновенных полей скорости ветра.

В то же время, имеется ряд указаний на то, что для описания ветро-волнового взаимодействия применимо так называемое квазилинейное приближение. Оно аналогично подходу, который широко применяется в физике плазмы, при этом волновые возмущения, индуцированные в воздухе волнами на поверхности воды, рассматриваются в линейном приближении, а в уравнении для средних компонент скорости необходимо учитывать нелинейные слагаемые – волновые потоки импульса или волновые напряжения. Квазилинейное приближение для описания взаимодействия волн с ветровым потоком было предложено в [8,21–23]. Оно широко используется для моделирования ветровой накачки при в моделях прогноза ветрового волнения (см., например, [24]).

Преимуществом квазилинейной модели турбулентного пограничного слоя над взволнованной поверхностью воды является ее простота, так как в ее рамках величина коэффициента аэродинамического сопротивления водной поверхности определяется только спектром поверхностного волнения без необходимости учитывать мгновенные характеристики ветро-волнового взаимодействия. Вследствие этого модель удобна для прогнозирования и имеет широкие перспективы применения. Однако значительные допущения, используемые в квазилинейном приближении для описания индуцированных поверхностными волнами возмущений в пограничном слое атмосферы, требуют верификации. Был проведен ряд физических и численных экспериментов, направленных на проверку модели.

В физическом эксперименте [25], в лабораторном эксперименте с использованием метода PIV была изучена структура турбулентного пограничного слоя над волнами, генерируемыми волнопродуктором. Сопоставление результатов измерений с расчетами в рамках квазилинейно модели показали

хорошее согласие величин средней скорости ветра, турбулентных напряжений, а также фазы основных гармоник индуцированных волнами компонент скорости. Кроме того, было показано, что квазилинейная модель также воспроизводит параметр взаимодействия ветровых волн, предложенного в [26].

Применимость модели также была подтверждена путем прямого численного моделирования воздушного потока над периодическими поверхностными волнами конечной амплитуды (см. [27]). Как и в физическом эксперименте, на мгновенных полях скорости наблюдался отрыв потока на гребнях волн, однако усредненные по ансамблю поля скорости имели характерные структуры, аналогичные образующимся в сдвиговых течениях вблизи критических уровней, где фазовая скорость возмущения совпадает со скоростью потока. Сравнение с расчетом показало, что квазилинейная модель хорошо воспроизводит профили средней скорости ветра, турбулентные напряжения, амплитуды и фазы основных гармоник волновых индуцированных компонент скорости, а также индуцированные волнами колебания давления и скорость роста ветровой волны.

Описанные работы указывают на применимость квазилинейной модели турбулентного пограничного слоя в идеализированных условиях: при взаимодействии воздушного потока с гармоническими волнами, бегущими вдоль него. Настоящая работа посвящена изучению ее применимости к описанию взаимодействия ветра и создаваемого им волнения в натуральных и лабораторных условиях, когда спектр волнения широкий, но волны по-прежнему крутые.

### **Цель работы**

Целью работы является оценка применимости квазилинейных моделей для описания ветра и волнения на коротких разгонах на основе сопоставления с данными лабораторных и натуральных экспериментов. Для реализации этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Усовершенствовать методики и создать оборудование для изучения приводного пограничного слоя и поверхностного волнения в условиях коротких разгонов.

2. Получить массив достоверных экспериментальных данных и на их основании параметризовать характеристики ветра и волнения в условиях коротких разгонов.

3. Проверить применимость слабо-нелинейных моделей для описания ветрового потока и поверхностного волнения в присутствии крутых поверхностных волн.

## Научная новизна

1. Предложена новая схема расположения датчиков скорости ветра для определения характеристик турбулентного пограничного слоя атмосферы над взволнованной водной поверхностью методом профилирования в условиях коротких разгонов волн.

2. Получена немонотонная зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_D$  от скорости ветра: показан значительный рост коэффициента при уменьшении скорости ветра при скоростях ветра до 4 м/с.

3. Экспериментально подтвержден спектр Филлипса в условиях коротких и сверхкоротких разгонов: как для свободных, так и для связанных волн.

4. В рамках натурального эксперимента подтверждена применимость квазилинейной модели приводного пограничного слоя атмосферы над взволнованной водной поверхностью в присутствии сильно-нелинейных волн, характерных для малых разгонов.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. На результат измерения коэффициента аэродинамического сопротивления водной поверхности  $C_D$  в условиях малых разгонов оказывает существенное влияние учет низко расположенных датчиков скорости ветра.

2. Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления водной поверхности  $C_D$  от скорости ветра немонотонна, а именно, значения  $C_D$  уменьшаются с ростом скорости ветра при скоростях ветра до 4 м/с, и имеется тенденция к насыщению при скоростях ветра, близких к ураганным.

3. На коротких и сверхкоротких разгонах волн высокочастотные асимптотики спектров волнения соответствуют спектру насыщения Филлипса, что указывает на их нелинейный характер.

4. Квазилинейная модель приводного пограничного слоя атмосферы над взволнованной водной поверхностью позволяет корректно описать закон сопротивления в приводном пограничном слое в присутствии сильно-нелинейных волн на поверхности воды.

## Достоверность научных результатов

Все полученные результаты обладают высокой степенью достоверности и являются обоснованными. Подтверждением этого служит хорошее качественное и количественное совпадение результатов, полученных экспериментально в натуральных и лабораторных условиях, а также с использованием квазилинейной модели турбулентного пограничного слоя и численной модели волнения WAVEWATCH III. Физическая трактовка полученных результатов, находится в согласии с общепризнанными представлениями. Основные положения диссертации опубликованы в ведущих зарубежных журналах, до-

кладывались на международных и всероссийских конференциях и неоднократно обсуждались на семинарах в ИПФ РАН.

### **Апробация результатов работы и публикации**

Результаты диссертации были использованы в ходе исследовательских работ в рамках грантов РФФИ (инициативные, региональные, ориентированные на фундаментальные исследования - ОФИМ, международные), проектов в рамках Федеральной целевой программы Минобрнауки «Мировой океан», гранта Правительства Российской Федерации, выделенного на конкурсной основе для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (11.G34.31.0048), грантов РНФ (14-17-00667, 15-17-20009).

Результаты, полученные в ходе выполнения работы, вошли в Отчеты РАН за 2012, 2013, 2014 и 2015 гг.

Основные результаты и положения работы доложены:

- на международных конференциях: EGU General Assembly, 2012, 2013, 2014, и 2015 гг.; EMS Annual Meeting, 2012, 2013, 2015 гг.; WISE meeting (Waves in Shallow water Environment) 2014 и 2015 гг.; 40th COSPAR Scientific Assembly, 2014 г.; International scientific school of young scientists Wave and Vortices in Complex Media, 2013 и 2014 гг.; V International conference «Frontiers of nonlinear physics – 2013»; International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012г.

- на российских конференциях: Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», 2014 г.; Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 2015; Форум молодых учёных ННГУ. Нижний Новгород: 2013; Нижегородская сессия молодых ученых (секции «Технические науки» в 2014 г. и «Естественные науки» в 2013 г.).

- на семинарах ИПФ РАН.

Результаты диссертации изложены в 36 работах автора, из которых 5 – статьи, опубликованные в реферируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 31 – статьи в сборниках трудов и тезисы докладов на российских и международных конференциях.

### **Личный вклад автора**

Автор диссертации принимал непосредственное участие в разработке методики и измерительной аппаратуры, планировании и проведении экспериментов, описанных в работе, а также в обработке полученных экспериментальных данных с использованием как разработанных автором, так и сторон-

них программных решений: автор написал основную часть программного обеспечения, использованного в работе, в том числе программы для получения пространственных спектров по данным волнографов и программы для исследования профилей скорости, получаемых в натуральных условиях.

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 95 страниц, включая 42 рисунка. Список литературы содержит 87 наименований, включая работы автора.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность работы, формулируются её цели, кратко излагается содержание диссертации.

В **Главе 1** описывается проведение на Горьковском водохранилище исследования параметров ветро-волнового взаимодействия с использованием измерительной платформы оригинальной конструкции. В разделе 1.1 проводится обзор методик восстановления параметров турбулентного пограничного слоя атмосферы над взволнованной водной поверхностью и параметров ветрового волнения; в частности, объясняется преимущество метода профилирования для исследования турбулентного пограничного слоя. Проводится обозначение основных измеряемых характеристик турбулентного пограничного слоя: скорости ветра, приведенной к стандартной метеорологической высоте 10 м  $U_{10}$ , скорости трения  $u_*$ , которая определяет турбулентный поток импульса в пограничном слое, и коэффициента аэродинамического сопротивления водной поверхности  $C_D = (u_* / U_{10})^2$ . В разделе 1.2 описывается Горьковское водохранилище, а именно, его географические характеристики и характерные для него метеорологические условия. Обсуждается сильная зависимость наблюдаемых ветров от точки измерения, а также расположенные в районе водохранилища метеообсерватории. Раздел 1.3 посвящен описанию используемого оборудования, а также самой буйковой станции, сконструированной на базе океанографической вехи Фруда. Веха имеет низкую резонансную частоту, за счет чего «игнорирует» высокочастотное волнение, оставаясь неподвижной относительно среднего уровня взволнованной поверхности воды. Это позволяет использовать на ней антенну струнных волнографов, подразумевающих неподвижное размещение, а также измерять скорость ветра на фиксированных горизонтах с использованием жестко закрепленных на вехе датчиков скорости. В разделе 1.4 описывается методика измерения параметров воздушного потока и ход обработки полученных данных. Важная особенность проведенных измерений – расположение датчиков скорости ветра в непосредственной близости к поверхности воды, причем нижний сенсор размещен на отдельном поплавке, отслеживающем форму волны; его область

измерения находится на высоте 10 см от воды. Выбор подобной конфигурации расположения датчиков обусловлен особенностями воздушного потока над взволнованной водной поверхностью, и, в частности, на коротких разгонах. В условиях коротких разгонов атмосферный пограничный слой формируется над твердой поверхностью берега, а затем «адаптируется» к условиям взволнованной водной поверхности, причем эта перестройка происходит снизу вверх. Именно параметры заново формирующегося пограничного слоя, «приспособленного» к волнению, обуславливают его взаимодействие с волнами на поверхности воды, вследствие этого измерение характеристик воздушного потока необходимо проводить вблизи поверхности воды – в турбулентном пограничном слое, обусловленном только волнением. При этом, основное возмущение, вносимое волнами в воздушный поток, – изгиб ветра вдоль поверхности воды; оно экспоненциально спадает с высотой [28]. Следовательно, чтобы датчик скорости был неподвижен относительно средних линий тока, на удалении от поверхности необходимо проводить измерения скорости на фиксированном горизонте, а измерения вблизи к поверхности должны проводиться с использованием отслеживающего форму волны датчика. Далее объясняется выбор интервала усреднения профиля скорости ветра на основании характерных для атмосферного планетарного пограничного слоя масштабов, а также спектров флюктуаций скорости ветра. Описывается используемый при обработке метод профилирования, а также рассматривается возможное влияние судна на результат измерений и описывается модель учета этого влияния. В [разделе 1.5](#) описывается алгоритм обработки сигнала с волнографов, аналогичный Wavelet Directional Method (WDM) [29], но использующий преобразование Фурье для разложения сигнала по гармоническим функциям. Преимущество предложенного алгоритма перед WDM – разрешение кратных гармоник по частоте. В [разделе 1.6](#) представлены результаты проведенных на Горьковском водохранилище экспериментов. [Подраздел 1.6.1](#) посвящен результатам восстановления параметров турбулентного пограничного слоя. Проведено сравнение использования различных конфигураций расположения датчиков (рисунок 1). Продемонстрировано, что использование предложенной модификации метода профилирования, а именно расположение датчиков в непосредственной близости к поверхности воды, в том числе на отслеживающем форму волны поплавке, существенно влияет на результат измерений. Восстанавливаемые значения коэффициента  $C_D$  в области умеренных ветров оказываются ниже полученных в аналогичных условиях [30,31]; при этом наблюдается значительный рост значений коэффициента  $C_D$  при уменьшении скорости ветра при слабых ветрах. Кроме этого, отмечено, что при использовании автономной заякоренной вехи в сравнении со случаем связанной кабелем с судном, значения коэффициента  $C_D$  лежат выше, но, во-первых, остаются в пределах статистической погрешности, а во-вторых, по-прежнему лежат ниже результатов [30,31]. По результатам экспе-

римента предложена параметризация зависимости коэффициента  $C_D$  от скорости ветра

$$C_D = 0.00124U_{10}^{-1} + 0.00034 + 0.000049U_{10}. \quad (1)$$

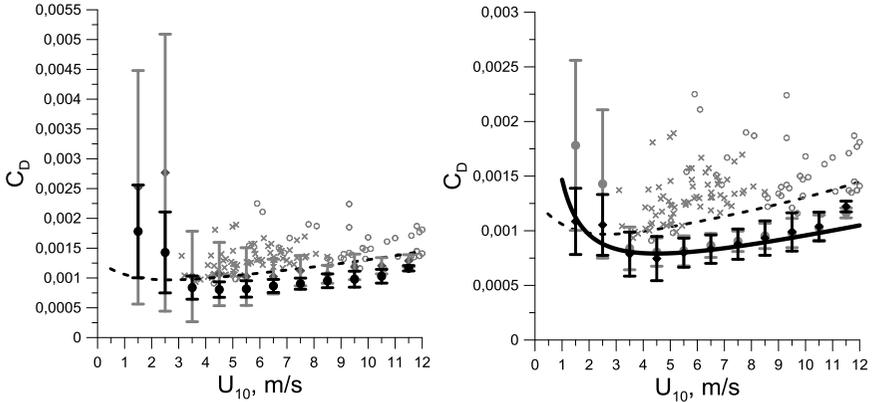


Рисунок 1. Сравнение восстановленных зависимостей  $C_D(U_{10})$  с различными конфигурациями датчиков: ● (●) – 4 верхних датчика (здесь и далее в качестве допустимых интервалов использовано среднеквадратичное отклонение); ◆ – все пять датчиков; ◆ – только двое нижних датчиков; ○ – результаты из [30]; × – результаты из [31]; пунктирная линия – эмпирическая океаническая параметризация COARE 3.0 [32], сплошная линия – аппроксимация (1).

В подразделе 1.6.2 описываются результаты восстановления характеристик ветрового волнения. Продемонстрировано, что в условиях Горьковского водохранилища спектры волнения имеют высокочастотные асимптотики  $\omega^{-5}$  и  $k^{-3}$ , соответствующие спектру насыщения Филлипса, что говорит о сильной нелинейности волн и основном механизме их диссипации – обрушении. Были получены константы насыщения спектров, значения которых имеют большой разброс, но находятся в удовлетворительном согласии с предложенной в [33] функцией

$$\alpha = 0.003(U_{10}/c_p)^{0.55}, \quad (2)$$

определяющей зависимость константы насыщения  $\alpha$  от параметра возраста волнения  $U_{10}/c_p$ , где  $U_{10}$  – скорость ветра на стандартной метеорологической высоте 10 м,  $c_p$  – фазовая скорость волны пика спектра.

Анализ двумерных пространственно-временных спектров показал, что для высокочастотной области хорошо выполняется дисперсионной соотно-

шение для свободных гравитационных волн на глубокой воде  $\omega = \sqrt{gk}$ . Анализ углового распределения направленных пространственных спектров продемонстрировал, что ширина углового спектра не зависит от скорости ветра и соответствует характерному для морских условий угловому распределению волновых векторов  $\cos^2 \vartheta$ .

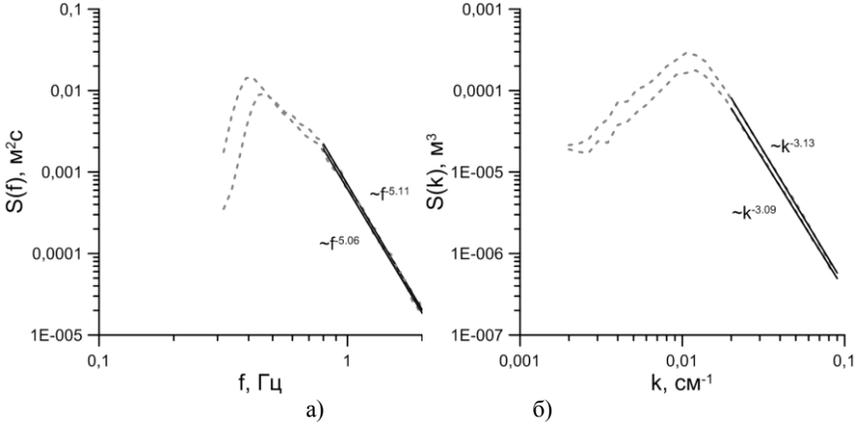


Рисунок 2. Усредненные за 60 минут частотный (а) и пространственный (б) спектры волнения для скорости ветра  $U_{10} = (6 \div 7)$  м/с.

Основные результаты данной главы опубликованы в работах соискателя [4а, 5а, 7а-10а, 12а-15а].

**Глава 2** посвящена лабораторному моделированию ветро-волнового взаимодействия. В [разделе 2.1](#) обсуждается возможность моделирования атмосферного турбулентного пограничного слоя над реальным водоемом в лабораторных условиях. В [разделе 2.2](#) приведено описание устройства и характеристик экспериментальной установки. В [разделе 2.3](#) описываются использованные контактные методы измерения параметров ветрового потока. Показано, как параметры слоя постоянных потоков могут быть получены из измерений в «следной» части турбулентного пограничного слоя, на основе автомодельности профиля дефекта скорости в развивающемся пограничном слое [34]. В [разделе 2.4](#) кратко описывается применение антенны струнных волнографов в условиях лабораторного моделирования. В [разделе 2.5](#) приведены результаты лабораторного моделирования, а также сопоставления полученных результатов с данными натурного эксперимента. В [подразделе 2.4.1](#) представлены результаты восстановления значений коэффициента  $C_D$  для разных скоростей ветра. Показано, что полученная зависимость коэффициента сопротивления поверхности от скорости ветра демонстрирует тенденцию к насыщению, при этом находится в хорошем согласии с результатами натурных исследований в ураганных условиях [35]. Сопоставление данных натур-

ного и лабораторного экспериментов показало, что предложенная по результатам измерений на Горьковском водохранилище параметризация (1) зависимости коэффициента  $C_D$  от скорости ветра корректно описывает результаты лабораторного моделирования за исключением области насыщения (рисунок 3). При этом область насыщения зависимости ( $U_{10} > 27$  м/с) аппроксимируется медленно растущей линейной функцией

$$C_D = 1.29 \cdot 10^{-5} U_{10} + 0.0015. \quad (3)$$

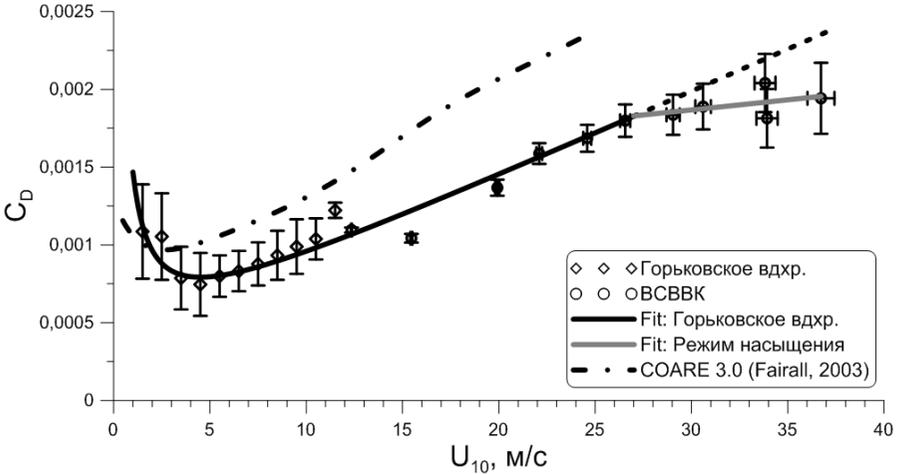


Рисунок 3. Зависимость коэффициента сопротивления поверхности от скорости ветра. ◇ – натурные данные, ○ – результаты лабораторного моделирования, черная сплошная линия – аппроксимация (1) натуральных данных, серая линия – линейная аппроксимация (3) режима насыщения, штрих-пунктирная линия – эмпирическая модель COARE 3.0 [32].

Подраздел 2.4.2 посвящен результатам исследования характеристик ветрового волнения в лабораторных условиях. Показано, что в лабораторных условиях высокочастотная часть спектра определяется связанными волнами: наблюдается линейная зависимость  $\omega(k)$ , то есть постоянство фазовой скорости для различных гармоник. Как и в натуральных условиях, наклон  $k^{-3}$  пространственного спектра в коротковолновой области соответствует спектру насыщения Филлипса, при этом асимптотика временного спектра  $\omega^{-3}$  соответствует линейному дисперсионному соотношению, на глубокой воде описывающему связанные волны. Продемонстрировано, что пиковые значения пространственной и временной частот лежат выше дисперсионного соотношения для свободных волн. При этом учет эффекта нелинейности волн приводит к хорошему соответствию восстановленного пространственно-временного спектра дисперсионному соотношению. Также показано, что ши-

рина углового распределения направленного пространственного спектра значительно меньше, чем в натуральных условиях, но так же не зависит от скорости ветра. Далее проводится сопоставление полученных в натурном и лабораторном экспериментах констант насыщения Филлипса. Демонстрируется (рисунок 4а), что функция аппроксимации натуральных данных

$$\alpha = 0.004(U_{10}/c_p)^{0.44} \quad (4)$$

описывает лабораторные результаты немного лучше функции (2), при этом в области  $U_{10}/c_p \sim 1$ , соответствующей полностью развитому волнению (или, что чаще в условиях малых водоемов, – волнам зыби при стихающем ветре) различие зависимостей (2) и (4) составляет 33%

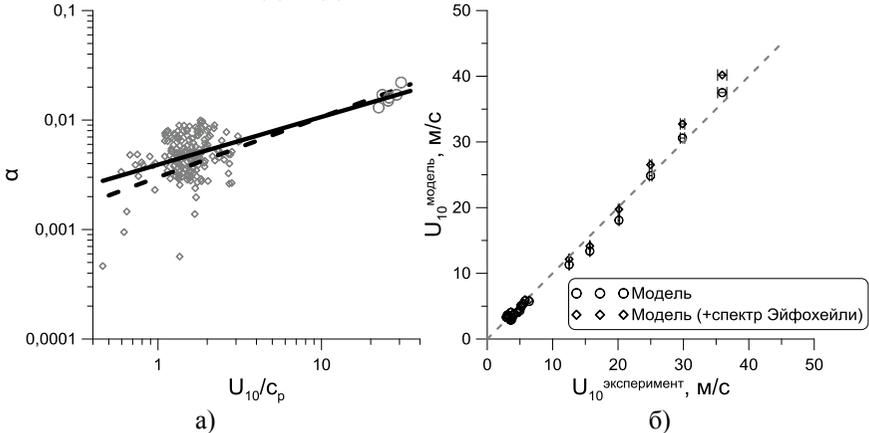


Рисунок 4. а) Зависимость коэффициента насыщения  $\alpha$  от параметра возраста волнения.  $\diamond$  – результаты натурального эксперимента,  $\circ$  – результаты лабораторного моделирования, пунктирная линия – функция (2), сплошная линия – аппроксимация натуральных данных функцией (4). б) Сравнение результатов численного моделирования с по данным натурального и лабораторного экспериментов.  $\diamond$  – расчет с использованием экспериментального спектра;  $\circ$  – расчет с использованием дополненной модельной функцией (5) экспериментального спектра.

Основные результаты данной главы опубликованы в работах соискателя [1а-3а, 6а, 11а].

В **Главе 3** проводится сравнение результатов численного моделирования с использованием квазилинейной модели приводного пограничного слоя атмосферы над взволнованной водной поверхностью и спектральной модели волнения WAVEWATCH III. В разделе 3.1 обсуждается применимость рассматриваемых моделей в исследуемых условиях. Раздел 3.2 посвящен квазилинейной модели приводного пограничного слоя атмосферы над взволнованной водной поверхностью. В подразделе 3.2.1 кратко описывается физическая составляющая квазилинейной модели. Подразделы 3.2.2-3.2.3 посвящены со-

поставлению результатов численного счета и данных экспериментов. Показано (рисунок 4б), что расчет профиля скорости в рамках квазилинейной модели хорошо согласуется с результатами лабораторного моделирования в случае учета коротковолновой части спектра, нерегистрируемой в эксперименте. Коротковолновая часть спектра была получена дополнением экспериментального спектра модельной функцией, предложенной Эйфохейли [36]:

$$S_{\text{tot}}(k) = S(k) + \frac{10^{-2}}{2} \left( 1 + 3 \ln \frac{u_*}{c_m} \right) \frac{c_m}{c} e^{-\frac{1}{4} \left( \frac{k}{k_m} - 1 \right)^2}, \quad (5)$$

где  $k_m = 3k_p$ , а  $c_m$  - соответствующая волновому числу  $k_m$  фазовая скорость волны. При этом учет коротковолновой части спектра в случае натурального эксперимента практически не влияет на результат численного моделирования.

В разделе 3.3 рассматривается применение в численной модели WAVEWATCH III предложенной на основании данных натурального эксперимента параметризации (1) зависимости коэффициента  $C_D$  от скорости ветра.

Подраздел 3.3.1 посвящен описанию базовых принципов модели WAVEWATCH III. В подразделе 3.3.2 приводится сравнение результатов и численного моделирования на базе натуральных данных и полученных в натурном эксперименте результатов. Показано, что использование предложенной параметризации коэффициента  $C_D$ , полученной путем измерений с использованием модифицированного метода профилирования, значительно улучшает согласие результатов численного счета и экспериментальных данных.

Основные результаты данной главы опубликованы в работах соискателя [1а, 4а, 5а, 12а-14а].

В **Заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработана методика, представляющая собой адаптацию стандартного метода профилирования приводного пограничного слоя к условиям коротких разгонов волн. Создан мобильный автономный комплекс на базе океанографической вехи Фруда для определения характеристик турбулентного пограничного слоя атмосферы над взволнованной водной поверхностью и параметров ветрового волнения, учитывающий предложенные изменения, а именно:

1) датчики скорости ветра располагаются близко к поверхности воды, что позволяет восстанавливать характеристики той части пограничного слоя, которая определяет развитие волн;

2) для измерения скорости ветра используются ультразвуковые датчики, диапазон достоверно измеряемой скорости ветра которых включает в себя штилевые условия.

3) для определения характеристик волнения используется антенна струнных волнографов.

Получен массив достоверных данных одновременных измерений параметров турбулентного пограничного слоя и ветрового волнения на коротких разгонах.

2. Разработано программное обеспечение для определения параметров турбулентного пограничного слоя над взволнованной водной поверхностью, а также спектральных характеристик ветрового волнения на основе Fourier Directional Method (FDM), заключающегося в сопоставлении Фурье-спектров сигналов, полученных с разнесенных в пространстве датчиков. По измеренному массиву данных восстановлены следующие параметры: скорость трения –  $u_*$ , скорость ветра, приведенная к стандартной метеорологической высоте 10 м, –  $U_{10}$ , коэффициент аэродинамического сопротивления –  $C_D$ , пространственно-временные трехмерные спектры волнения –  $S(\omega, k, \vartheta)$ .

3. По данным натуральных и лабораторных экспериментов определена зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления водной поверхности  $C_D$  от скорости ветра. Показано, что зависимость немонотонна, а именно, значения  $C_D$  уменьшаются с ростом скорости ветра при скоростях ветра меньше 4 м/с, и наблюдается тенденция к насыщению при скоростях ветра, близких к ураганным. Предложена параметризация зависимости коэффициента  $C_D$  от скорости ветра, учитывающая данные особенности.

4. На основе данных измерений с использованием антенны струнных волнографов получены спектральные характеристики ветрового волнения на коротких и сверхкоротких разгонах. Показано, что высокочастотные асимптотики спектров волнения по волновым числам в данных условиях соответствуют спектру насыщения Филлипса, что указывает на сильно-нелинейный характер волн. Показано, что асимптотики частотного спектра соответствуют дисперсионному соотношению: в натуральных условиях соотношению для свободных гравитационных на глубокой воде, в лабораторных условиях – для связанных волн. Получена зависимость константы Филлипса от возраста волнения, уточняющая известные результаты.

5. На основании сопоставления результатов численного моделирования с данными натурального и лабораторного экспериментов показано, что квазилинейная модель приводного пограничного слоя атмосферы над взволнованной водной поверхностью позволяет корректно описать закон сопротивления в приводном пограничном слое в присутствии сильно-нелинейных волн на поверхности воды, характерных для коротких разгонов.

## СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tolman H.L.* User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 166, 110 pp
2. *Gunter H., Hasselmann S., Janssen P.A.E.M.* The WAM model cycle 4. Technical report No. 4, Hamburg, 1992.
3. *SWAN team.* SWAN – user manual. Delft University of technology, Environmental Fluid Mechanics Section, 2006.
4. *Caudal G.* Self-Consistency between Wind Stress, Wave Spectrum, and Wind-Induced Wave Growth for Fully Rough Air-Sea Interface // *J Geophys Res.* 1993. Vol. 98(C12): 22743-22752.
5. *Makin V.K., Kudryavtsev V.N., Mastenbroek C.* Drag of the sea surface // *Bound.-Layer Meteorol.* 1995. Vol. 79. P. 159–182.
6. *Hwang P.A., Wang D.W.* An empirical investigation of source term balance of small scale surface waves // *Geophys Res Lett.* 2004. Vol. 31: L15301.
7. *Hwang P.A.* Wave number spectrum and mean square slope of intermediate-scale ocean surface waves // *J Geophys Res.* 2005. Vol. 110(C10029).
8. *Troitskaya Yu. I., Rybushkina G.V.* Quasi-linear model of interaction of surface waves with strong and hurricane winds // *Izv. - Atmospheric Ocean Phys.* 2008. Vol. 44, № 5. P. 621–645.
9. *Troitskaya Y.I., Sergeev D.A., Kandaurov A.A., Baidakov G.A., Vdovin M.A., Kazakov V.I.* Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2012. Vol. 117, № 6.
10. *Banner M.L., Melville W.K.* On the separation of airflow over water waves // *J Fluid Mech.* 1976. Vol. 77. P. 825–842.
11. *Kawamura H., Toba Y.* Ordered motion in turbulent boundary layer over wind waves // *J Fluid Mech.* 1988. Vol. 197. P. 105–138.
12. *Kawai S.* Structure of air flow separation over wind wave crest // *Bound-Layer Meteor.* 1982. Vol. 23. P. 503–521.
13. *Kawai S.* Visualization of air flow separation over wind wave crest under moderate wind // *Bound-Layer Meteor.* 1981. Vol. 21. P. 93–104.
14. *Hsu T.C., Hsu E.Y.* On the structure of turbulent flow over a progressive water wave: theory and experiment in a transformed wave-following coordinate system. Part 2 // *J Fluid Mech.* 1983. Vol. 131. P. 123–153.
15. *Hsu T.C., 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. Vol. 105. P. 87–117.
16. *Donelan M.A., Babanin A.V., Young I.R., Banner M.L., McCormick C.* Wave-follower field measurements of the wind-input spectral function. Part I: Measurements and calibrations // *J. Atmospheric Ocean. Technol.* 2005. Vol. 22, № 7. P. 799–813.
17. *Adrian R.J.* Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics //

- Annu Rev Fluid Mech. 1991. Vol. 23. P. 261–304.
18. *Reul N., Branger H., Giovanangeli J.P.* Air flow separation over unsteady breaking waves // *Phys Fluids*. 1999. Vol. 11(7). P. 1959–1961.
  19. *Reul N., Branger H., Giovanangeli J.P.* Air flow structure over short-gravity breaking water waves // *Bound-Layer Meteor.* 2008. Vol. 126. P. 477–505.
  20. *Veron F., Saxena G., Misra S.K.* Measurements of the viscous tangential stress in the airflow above wind waves // *Geophys Res Lett.* 2007. Vol. 34: L19603.
  21. *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 Ocean.* 1992. Vol. 22, № 8. P. 843–858.
  22. *Janssen P.A.E.M.* Wave-induced stress and the drag of air flow over sea waves // *J Phys Ocean.* 1989. Vol. 19. P. 745–754.
  23. *Reutov V.P., Troitskaya Yu.I.* Nonlinear growth rate of wind water waves and their excitation near the stability threshold // *Radiophys. Quantum Electron.* 1995. Vol. 38, № 3. P. 133–136.
  24. *Janssen P.A.E.M.* Interactions of ocean waves and wind. Cambridge Univ. Press. 2004. 300 p.
  25. *Troitskaya Yu., Sergeev D., Ermakova O., Balandina G.* Statistical parameters of the air turbulent boundary layer over steep water waves measured by the PIV technique // *J. Phys. Oceanogr.* 2011. Vol. 41, № 8. P. 1421–1454.
  26. *Miles J.W.* On the generation of surface waves by shear flows // *J Fluid Mech.* 1957. Vol. 3. P. 185–204.
  27. *Druzhinin O.A., Troitskaya Y.I., Zilitinkevich S.S.* Direct numerical simulation of a turbulent wind over a wavy water surface // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2012. Vol. 117, № 3.
  28. *Brooke B.T.* Shearing flow over a wavy boundary // *J FLUID MECH.* 1959. Vol. 11. P. 161–205.
  29. *Donelan M.A., Drennan W.M., Magnusson A.K.* Nonstationary analysis of the directional properties of propagating waves // *J. Phys. Oceanogr.* 1996. Vol. 26, № 9. P. 1901–1914.
  30. *Babanin A.V., Makin V.K.* Effects of wind trend and gustiness on the sea drag: Lake George study // *J. Geophys. Res. Oceans.* 2008. Vol. 113, № 2.
  31. *Ataktürk S.S., Katsaros K.B.* Wind stress and surface waves observed on Lake Washington // *J. Phys. Oceanogr.* 1999. Vol. 29, № 4. P. 633–650.
  32. *Fairall C.W. et al.* Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm // *J. Clim.* 2003. Vol. 16, № 4. P. 571–591.
  33. *Donelan M.A., Hamilton J., Hui W.H.* Directional Spectra of Wind-Generated Waves // *Philos. Trans. R. Soc. A.* 1985. Vol. 315. P. 509–562.
  34. *Hinze J.O.* An Introduction to its Mechanism and Theory. New York: McGraw-Hill. 1956. 586 p.
  35. *Powell M.D., Vickery P.J., Reinhold T.A.* Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones // *Nature.* 2003. Vol. 422, № 6929. P. 279–283.

36. *Elfouhaily T., Chapron B., Katsaros K., Vandemark D.* A unified directional spectrum for long and short wind-driven waves // *J Geophys Res.* 1997. Vol. 107, № 15. P. 781–796.

#### Список основных публикаций автора по теме диссертации

- 1а. *Troitskaya Yu.I., Sergeev D.A., Kandaurov A.A., Baidakov G.A., Vdovin M.I., Kazakov V.I.* Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions // *Journal of Geophysical Research*, v. 117, C00J21, 13 pp., 2012, doi:10.1029/2011JC007778
- 2а. *Troitskaya Yu.I., Ezhova E.V., Sergeev D.A., Kandaurov A.A., Baidakov G.A., Vdovin M.I., Zilitinkevich S.S.* Momentum and buoyancy transfer in atmospheric turbulent boundary layer over wavy water surface – Part 2: Wind-wave spectra // *Nonlin. Processes Geophys.*, v. 20, p. 841-856, 2013, doi:10.5194/npg-20-841-2013
- 3а. *Кандауров А.А., Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А., Вдовин М.И., Байдаков Г.А.* Среднее поле скорости воздушного потока над поверхностью воды при лабораторном моделировании штормовых и ураганных условий в океане // *Известия РАН ФАО*, т. 50, № 4, с. 455–467, 2014, DOI: 10.7868/S0002351514040063
- 4а. *Kuznetsova A.M., Baydakov G.A., Papko V.V., Kandaurov A.A., Vdovin M.I., Sergeev D.A., Troitskaya Yu.I.* Adjusting of wind input source term in WA-VEWATCH III model for the middle-sized water body on the basis of the field experiment // *Hindawi Publishing Corporation, Advances in Meteorology*, v. 2016, 574602, 13 pp., doi:10.1155/2016/8539127
- 5а. *Кузнецова А.М., Байдаков Г.А., Папко В.В., Кандауров А.А., Вдовин М.И., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И.* Натурные исследования и численное моделирование ветра и поверхностных волн на внутренних водоемах средних размеров // *Метеорология и гидрология*, 2016, №41(2), с.85-97, doi:10.3103/S1068373916020084
- 6а. *Troitskay Yu., Sergeev D., Kandaurov A., Baidakov G., Kazakov V.* Laboratory modelling of air-sea interaction under severe wind conditions // *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 3772-3775, 2012, doi:10.1109/IGARSS.2012.6350496
- 7а. *Байдаков Г.А., Богатов Н.А.* Натурные исследования особенностей воздушного потока над внутренними водоемами средних и малых размеров // *XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник докладов*, с. 291-293, Казань, 2015
- 8а. *Байдаков Г.А., Вдовин М.И., Кандауров А.А., Салин М.Б.* Сравнение результатов измерения характеристик волнения контактными и оптически-средствами // *Тр. XII Всерос. конф. «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. СПб.: Нестор-История, 2014. С. 233-236.

- 9a. *Baydakov G.A., Vdovin M.I., Kandaurov A.A., Papko V.V., Sergeev D.A., Troitskaya Yu.I.* Investigation of the wind-wave interaction in the inland basin. Aerodynamic drag coefficient // Proceedings of the 4-th international scientific school of young scientists Wave and Vortices in Complex Media, p. 6-7, Moscow, 2013
- 10a. *Baydakov G.A., Troitskaya Yu.I., Sergeev D.A., Vdovin M.I., Kandaurov A.A., Papko V.V.*, Investigation of the wind-wave interaction on the reservoir // Proceedings of the 5-th international scientific school of young scientists Wave and Vortices in Complex Media, p. 11- 13, Moscow, 2014
- 11a. *Troitskaya Yu., Ezhova E., Sergeev D., Kandaurov A., Baidakov G., Vdovin M.* On effect of wind surface waves on mass and momentum transfer in a stratified turbulent boundary layer // Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU2012-12187, 2012
- 12a. *Troitskaya Yu., Papko V., Baydakov G., Vdovin M, Kandaurov A., Sergeev D.* Wind-wave coupling in the atmospheric boundary layer over a reservoir: field measurements and verification of the model // Geophysical Research Abstracts, Vol. 15. EGU2013-2576, 2013
- 13a. *Baydakov G., Kuznetsova A., Sergeev D., Papko V., Kandaurov A., Vdovin M., Troitskaya Yu.* Field study and numerical modeling of wind and surface waves at the middle-sized water body // Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-9427, 2015.
- 14a. *Kuznetsova A., Troitskaya Yu., Kandaurov A., Baydakov G., Vdovin M., Papko V., Sergeev D.* Wind waves modelling on the water body with coupled WRF and WAVEWATCH III models // Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-497, 2015.
- 15a. *Marinina N., Troitskaya Yu., Sergeev D., Papko V., Baidakov G., Vdovin M., Kandaurov A., Zenkovich D., Kuznetsova A.* Field measurements of wind-wave interaction in the atmospheric boundary layer over a reservoir // Proceedings of the “Topical problems of nonlinear wave physics 2014”, p. 174.

БАЙДАКОВ Георгий Алексеевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ВЕТРОВОГО ПОТОКА И ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН  
НА КОРОТКИХ РАЗГОНАХ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати \_\_. \_\_. 2016 г.

Формат  $60 \times 90 \frac{1}{16}$ .

Усл. печ. л. \_\_. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_ (2016).

Отпечатано в типографии ИПФ РАН  
603950, г. н. Новгород, ул. Ульянова 46