

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по образованию  
ГОУ ВПО  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
(РГГМУ)

На правах рукописи  
УДК 551.465.7.072

Раинчик Светлана Евгеньевна

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ  
ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НАД  
ВОЛНАМИ**

25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук



Санкт – Петербург  
2010

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете

*Научные руководители:* доктор физико-математических наук, профессор  
**Карлин Лев Николаевич**  
доктор физико-математических наук, профессор  
**Чаликов Дмитрий Викторович**

*Официальные оппоненты:* доктор физико-математических наук  
**Кудрявцев Владимир Николаевич**  
кандидат физико-математических наук  
**Софьина Екатерина Владимировна**

*Ведущая организация:* Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт

Защита состоится 17 июня 2010 г. в 15 часов 30 минут на заседании Диссертационного совета Д.212.197.01 при Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, Санкт-петербург, Малоохтинский пр., 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан «15» мая 2010

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор географических наук, профессор



А.И. Угрюмов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Термодинамическое взаимодействие волн и ветра принадлежит к одной из наиболее важных проблем геофизической гидродинамики. В настоящее время этот процесс в параметризованной форме учитывается в формулировке граничных условий в океанских и атмосферных моделях, численных моделях прогноза погоды, моделях совместной циркуляции океана и атмосферы и моделях прогноза ветрового волнения. Тем не менее, точность этой параметризации в основном неизвестна. Главная трудность экспериментальных и теоретических исследований возникает из-за наличия многомодовой (а при обрушивании волн часто неоднозначной) нестационарной поверхности раздела. Из-за этого многие виды измерений в непосредственной близости к поверхности невозможны, а построение точных теоретических моделей описывающих взаимодействие волн и ветра сталкивается с чрезвычайными трудностями. Было бы чрезвычайно удобно предположить, что многомодовая поверхность взаимодействует с атмосферой как совокупность независимых линейных волн, а интегральные результаты могут быть представлены как линейная суперпозиция стационарных монохроматических процессов. Правомерность этого предположения никогда не была доказана. Наиболее перспективным методом исследования проблемы взаимодействия волн и ветра надо считать метод, основанный на прямом численном моделировании совместной динамики волн и ветра [1](Chalikov, 1998). Спектральный подход к этой проблеме, разумеется, необходим, но он должен использоваться лишь как метод численного решения нелинейных уравнений и как способ представления результатов. Известно также, что в реальном волновом поле волны имеют, как правило, более или менее острые гребни и пологие подошвы. Это является прямым следствием того, что полные уравнения имеют точное решение в виде волн Стокса, которые гораздо более устойчивы, чем гармонические волны той же амплитуды. Волны Стокса при наличии возмущений медленно трансформируются в результате неустойчивости Бенджамина-Фейера [4-6], тогда как гармонические волны немедленно распадаются в отсутствие возмущений. В результате, многомодовое поле точнее аппроксимируется совокупностью нелинейных мод (волн Стокса), чем стандартным представлением в виде суперпозиции гармонических волн.

При разложении волнового поля по волнам Стокса число нелинейных мод необходимых для достижения определённой точности меньше, чем число мод Фурье.

### **Цель диссертационной работы**

- модель сформулирована как спектральная проблема в конформных координатах с высоким разрешением;

- волны являются объектом моделирования: полные волновые уравнения интегрируются одновременно с уравнениями для пограничного слоя с детальной склейкой решений на свободной поверхности;

- применяется хорошо развитый и мощный Фурье/сеточный метод. Эта модель полностью завершена. В настоящей работе дано описание модели Волнового Пограничного Слоя (ВПС), сравнение с некоторыми экспериментальными данными и иллюстрируются основные различия в обтекании воздушным потоком гармонических волн и волн Стокса.

В настоящей работе ставятся следующие задачи:

а) изучить влияние нелинейности процесса путём сравнения структуры турбулентных потоков над гармоническими волнами и волнами Стокса. Изучить влияние заострённости волн на сопротивление формы;

б) детально исследовать структуру пограничного слоя атмосферы над морем путём воспроизведения статистического режима взаимосвязанных полей в воде и воздухе;

в) разработать параметризацию динамического взаимодействия океана и атмосферы для прогностических моделей ветрового волнения и взаимодействия океана и атмосферы.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

а) Показано, что аппроксимация волн гармоническими функциями приводит к ошибкам в расчёте сопротивления формы, достигающими 50%. Таким образом, рекомендации, основанные на представлении волнового поля в виде суперпозиции линейных мод, существенно занижают значения обмена импульсом и энергией между ветром и волнами. Этот результат является главным аргументом в пользу совместного моделирования ВПС и волновой моделью, воспроизводящей нелинейные эффекты.

б) Рассчитанные в результате численного моделирования с объединённой моделью позволили получить спектральные статистические характеристики структуры пограничного слоя: полей давления и скорости. Показано, что путем нормировки вертикальной координаты волновыми числами вертикальные профили многих характеристик приобретают универсальную форму и могут быть параметризованы.

в) Полученные статистические данные позволили построить комплексную  $\beta$ -функцию, связывающую фурье-компоненты профиля волновой поверхности с фурье-компонентами поверхностного давления. Эта линейное представление неявно учитывает нелинейные механизмы генерации поля давления.  $\beta$ -функция является основой для расчета притока энергии к волнам в прогностических волновых моделях.

г) Изучены вертикальные профили продуцируемого волнами вертикального потока горизонтального импульса – основного механизма отличающего ВПС от пограничного слоя над плоской поверхностью.

д) На основе двумерного моделирования построена одномерная модель ВПС, позволяющая описать его структуру с учётом произвольного спектра волн. Модель предназначена для включения в прогностические модели волн, а также для параметризации взаимодействия океана и атмосферы в прогностических моделях прогноза погоды и теории климата.

### Научная новизна

Новый подход к проблеме был сформулирован на принципиально новой основе:

- обе модели сформулированы в конформных координатах с высоким разрешением;

- волны являются объектом моделирования: полные волновые уравнения интегрируются одновременно с уравнениями для пограничного слоя с детальной склейкой решений на свободной поверхности;

Атмосферная модель включает двумерные уравнения Рейнольдса для импульса, уравнения эволюции энергии турбулентности, уравнения эволюции скорости диссипации (дополненные рядом диагностических соотношений); волновая модель основана на кинематическом и динамическом условиях на поверхности и уравнении Лапласа. Эта исключительно сложная модель полностью завершена:

- дана её математическая формулировка,
- разработана конечно-разностная схема,

- написана и проверена путем контроля различных инвариантов ФОРТРАН программа.

- проведено сравнение наиболее критических выходных параметров с экспериментальными данными.

### **Теоретическая и практическая ценность работы**

Конкретной фундаментальной проблемой, не исследованной ранее, является доказательство принципиальной роли нелинейности в мелкомасштабном взаимодействии океана и атмосферы и разработка новых методов параметризации этих процессов.

Предполагается, что полный учёт нелинейности позволит объяснить детальную физику взаимодействия волн и ветра, устранить многочисленные противоречия, обнаруженные в экспериментальных исследованиях, построить новые методы параметризации этих процессов. Сформулированная проблема важна для формулировки граничных условий для атмосферы, океана и в особенности для объединённых моделей атмосферы и океана.

Существуют также разнообразные технические приложения. Например, знание структуры волновых пульсаций важно для проектирования низколетящих летающих аппаратов.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 116 страниц, включая 28 рисунков и 1 таблицу. Список литературы составляет 60 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В настоящей работе была использована модель двухслойной жидкости с поверхностью раздела, основанная на уравнениях Рейнольдса и двумерных уравнениях потенциальных волн, разработанная Д.В. Чаликовым. Модель использовалась в двух конфигурациях.

В первой серии расчётов была проведена оценка влияния заострённости волн на процесс обтекания. В качестве начальных условий использовались волны, задаваемые по теории волн малой амплитуды и волны Стокса. Для каждого типа волн рассчитывались 24 варианта для различных скоростей ветра и крутизны. Для того, чтобы сравнение результатов для двух типов волн было более отчётливо, волновая модель использовалась только для того, чтобы перемещать заданные в начальных условиях волны с заданной фазовой скоростью (в обоих случаях использовалась линейная фазовая скорость). Расчёты показали, что для волн Стокса циркуляция в пограничном слое в целом более интенсивна, чем над линейными волнами. Соответственно, волны Стокса получают от ветра значительно больше энергии. Это происходит, несмотря на то, что потенциальная энергия волн Стокса меньше, чем энергия линейных волн той же амплитуды. В связи с этим, можно ожидать, что поток энергии к реальным волнам, которые имеют преимущественно острые гребни и пологие подошвы будет заметно больше потока энергии к волновому полю, представляющему собой суперпозицию линейных волн. Второй вывод из проведённых расчётов касается роли нестационарности. В действительности, поток энергии к волнам определяется их реальной формой в физическом пространстве. Благодаря многомодовости волнового поля, продуцируемая волнами циркуляция всегда нестационарна, и создаваемое ею поверхностное давление может значительно отличаться от давления, вычисляемого по линейной теории.

Вторая серия расчётов была посвящена моделированию совместной динамики волн и ветра. Такие расчёты проведены впервые в мире. Модель состоит из двух различных моделей объединённых в одну систему. Модели интегрируются одновременно с обменом информации через поверхность раздела. Обе модели записаны в конформной системе координат. Использование таких координат является, пожалуй, единственным подходом, позволяющим решить проблему построения достаточно эффективной численной схемы, поскольку конформность позволяет существенно упростить задачу по сравнению с такой же задачей формулируемой в общих криволинейных координатах. В противоположность другим подходам, задача формулируется как проблема статистической гидродинамики: объединённая модель используется для генерации огромных объёмов данных, которые затем подвергаются статистической обработке с целью получения статистически значимых выводов.

Объединенная модель используется для моделирования эволюции многомодового волнового поля, эволюционирующего под воздействием ветра. Такие расчёты невозможно проводить без внесения новой физики в волновую модель. Во первых необходимо параметеризовать поток энергии в отброшенную часть волнового спектра. Это было достигнуто систематическим (и очень слабым) понижением потенциальной и кинетической энергии вблизи предельного волнового числа. В модель введены сглаживающие операторы:

$$\frac{\partial \eta_k}{\partial \tau} = E_k - \mu_k \eta_k, \quad \frac{\partial \varphi_k}{\partial \tau} = F_k - \mu_k \varphi_k$$

где  $E_k, F_k$  – Фурье-компоненты правых частей уравнений

$$\mu_k = \begin{cases} rM \left( \frac{|k| - k_d}{M - k_d} \right)^2 & \text{if } |k| > k_d, \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

где значения  $k_d = M/2$  и  $r = 0.25$  принимались для всех расчетов.

Без этого сглаживания вычисления в конце концов прерываются из-за развития нелинейной неустойчивости. Во вторых, для устойчивого счёта при наличии притока энергии было необходимо предотвращать опрокидывание волн, которое влечёт за собой возникновение бесконечно больших производных в физическом пространстве или разрастание числа Фурье мод для описания поверхности. С этой целью был разработан специальный алгоритм высоко селективного сглаживания на тех участках поверхности, где возникала очень большая кривизна. Алгоритм основан на диффузионном операторе, применённом к поверхностному потенциалу и возвышению:

$$\eta_\tau = E_\eta + J^{-1} \frac{\partial}{\partial \xi} B \frac{\partial \eta}{\partial \xi}, \quad \varphi_\tau = F_\varphi + J^{-1} \frac{\partial}{\partial \xi} B \frac{\partial \varphi}{\partial \xi},$$

где  $E$  – правая часть уравнения;

$F_\varphi$  – правая часть уравнения;

$B$  – коэффициент сглаживания.

Коэффициент сглаживания  $B$  зависит от второй производной от возвышения:

$$B = \begin{cases} C_b \left( \Delta \xi \frac{\partial^2 \eta}{\partial \xi^2} \right)^2 & \frac{\partial^2 z}{\partial \xi^2} > s \\ 0 & \frac{\partial^2 z}{\partial \xi^2} \leq s \end{cases},$$

где  $C_b$  имеет порядок 0.1, а пороговое значение второй производной  $s$  равно примерно 300.

Алгоритм диссипации не меняет полный объем, но понижает вертикальный и горизонтальный импульс и энергию.

Оба типа параметризации хорошо известны и давно применяются в геофизической гидродинамике, например введением алгоритма параметризации конвективной неустойчивости в атмосфере или использованием сглаживающих горизонтальных операторов высокого порядка в спектральных моделях атмосферы.

Проблема замыкания уравнений Рейнольдса давно является предметом многочисленных исследований. Тем не менее, хорошо известно, что замкнутая система уравнений Келлера-Фридмана не может быть получена формально, поэтому замыкание обычно использует множество качественных предположений. Применимость этих предположений может быть оправдана только путём сравнения результатов счёта с эмпирическими данными. В целом, оказывается, что все схемы не точны, но некоторые из них работают удовлетворительно. В настоящей модели использовалась схема замыкания, называемая  $K-\epsilon$  схемой. Схема основана на введении двух эволюционных уравнений: для энергии турбулентности и скорости диссипации энергии турбулентности. Применении этой схемы для потоков со сложной геометрией сопряжено со многими трудностями, поэтому дальнейшее усложнение подхода мы считаем нецелесообразным. Схема уже не очень проста. Наивно ожидать, что дальнейшее усложнение схемы замыкания турбулентности может приводить к улучшению результатов. Как правило, результаты становятся хуже, а модель часто становится неуправляемой, потому что в ней возникают незапланированные эффекты (например, появление отрицательной энергии турбулентности). В технической гидродинамике показано, что  $K-\epsilon$  схема даёт вполне удовлетворительные результаты для потоков с более сложной геометрией, чем та, которая наблюдается в ВПС. Энергия волновых возмущений в ВПС

не слишком велика, она имеют порядок энергии турбулентности, так что Волновой Пограничный Слой является обычным пограничным слоем, слабо возмущённым волновой движущейся поверхностью. Поэтому, даже простая схема  $K \sim ke^{1/2} \zeta$  для умеренной крутизны работает хорошо, и  $K - \epsilon$  схема была введена для того, чтобы описывать случаи отделения пограничного слоя.

Вообще говоря, любая схема замыкания для уравнений Рейнольдса не может быть названа идеальной. По мнению ряда специалистов, наиболее перспективным подходом является подход, основанный на технике моделирования трёхмерной крупномасштабной турбулентности (LES technique). Мгновенные динамические поля в ВПС выглядят довольно хаотично, тем не менее, после статистической обработки результатов обнаруживаются чёткие закономерности: вертикальные распределения компонент Фурье для давления, кинетической энергии и волновых потоков импульса оказываются отчётливо стратифицированными по волновым числам.

Полученные данные позволили определить так называемую  $\beta$ -функцию – комплексный коэффициент пропорциональности между компонентами Фурье для возвышения и поверхностного давления. Полученные данные о коэффициенте имеют довольно широкий разброс, однако, поскольку объем данных очень велик (1400000 единичных значений), форма  $\beta$ -функции оказалась установленной с удовлетворительной точностью. Функция  $\beta$  может быть аппроксимирована следующим выражением:

$$\beta_{-k} = \begin{cases} b_1 + d_1 (\Omega - \Omega_1) & \Omega < \Omega_1 \\ b_0 + a_0 (\Omega - \Omega_0) + a_1 (\Omega - \Omega_0)^2 & \Omega_1 \geq \Omega < \Omega_2 \\ b_2 + d_2 (\Omega - \Omega_2) & \Omega \geq \Omega_2 \end{cases}$$

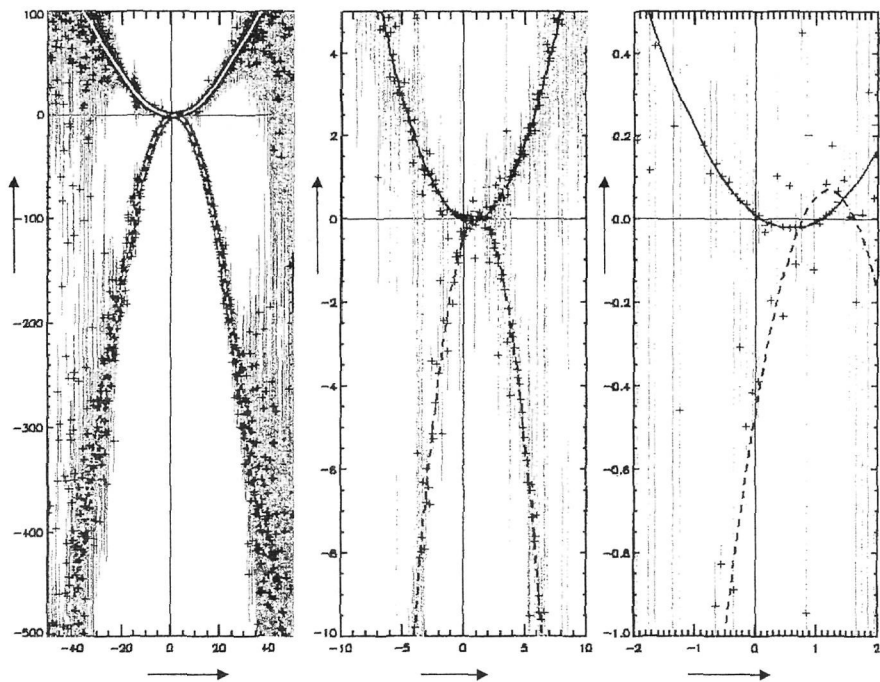
$$\beta_k = \begin{cases} b_3 + d_3 (\Omega - \Omega_4) & \Omega < \Omega_4 \\ b_4 + a_2 (\Omega - \Omega_3)^2 & \Omega_4 \geq \Omega < \Omega_5 \\ b_3 - d_3 (\Omega - \Omega_5) & \Omega > \Omega_5 \end{cases}$$

где численные параметры равны:

$$\Omega_0 = 0.7, \Omega_1 = -19.3, \Omega_2 = 20.7, \Omega_3 = 1.2, \Omega_4 = -18.8, \Omega_5 = 21.2,$$

$$a_0 = 0.02277, a_1 = 0.09476, a_2 = -0.3718, b_0 = -0.02, b_1 = 37.43, b_2 = 38.34,$$

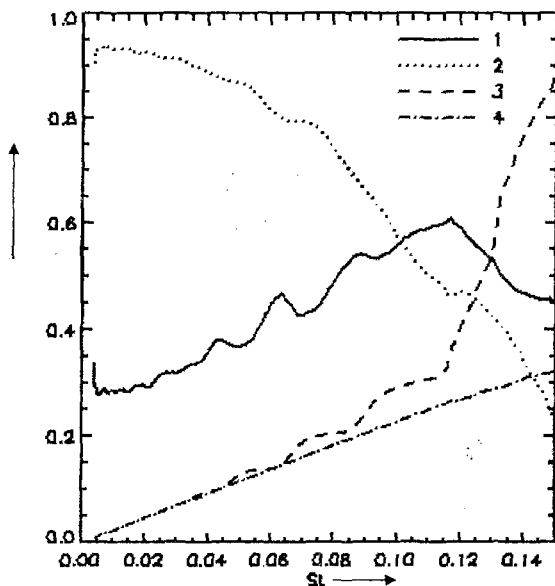
$$b_3 = -141.0, b_4 = 0.07, d_1 = -3.768, d_2 = 3.813, d_3 = 14.80$$



Левая секция – Функция  $\beta(\Omega)$ . Жирная линия (в левой секции – белая) соответствует значениям  $\beta_+$ , пунктирная линия –  $\beta_-$ . Знак + показывает средние значения в интервалах толщиной 0.1, серые отрезки соответствуют дисперсии  $\beta$ -функции. Две другие секции показывают ту же функцию в суженных диапазонах частот.

Рисунок 1 –  $\beta$ -функция.

Главной причиной разброса данных является скорее не погрешности постановки задачи и счёта, а нелинейность, которая генерирует значительные отличия от линейной схемы, основанной на  $\beta$ -функции. В частности, оказалось, что волновые возмущения генерируют спектр волновых пульсаций давления гораздо более широкий, чем предсказывает линейная теория.



Кривая 1 – нормализованная разница между  $p_0$  и  $p_b$ ; 2 – коэффициент корреляции между  $p_b$  и  $p_0$ ; 3 – дисперсия  $p_0$  4 – дисперсия  $p_b$ .

Рисунок 2 – Сравнение поверхностного давления рассчитанного совместной моделью  $p_0$ , с поверхностным давлением рассчитанным с помощью  $\beta$ -функции.

Существует множество причин, по которым метод, основанный на  $\beta$ -функции не может обеспечить удовлетворительную точность расчёта при большой крутизне. Главной из этих причин является, зависимость аномалий давления от локальной крутизны. Зависимость предполагает линейную связь между дисперсией давления и крутизной волн (кривая 4 на рисунке 2), в то время как дисперсия аномалий давления быстро растёт при увеличении крутизны (кривая 3 на рисунке 2). Этот эффект особенно четко проявляется при сравнении значений  $p_0$  и  $p_b$  показанном на рисунке 3 для различной крутизны.

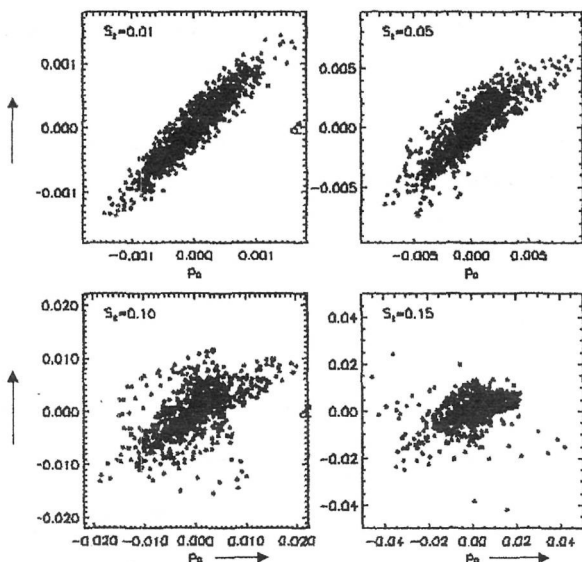


Рисунок 3 – Сравнение индивидуальных значений поверхностного давления  $p_b$ , рассчитанного на основе  $\beta$ - функции с давлением рассчитанным моделью для различных значений интегральной крутизны  $S_b$ .

Зависимость локального потока импульса  $|ph_x|$  от локального наклона  $|h_x|$ , осреднённая по 396 волновых записей показана на рисунке 4.

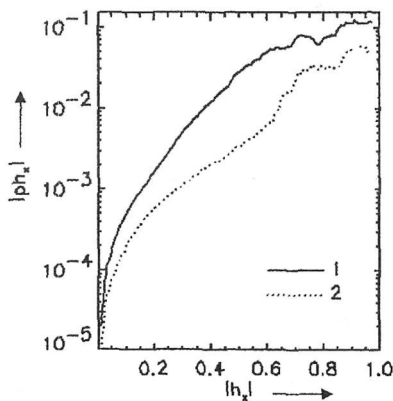
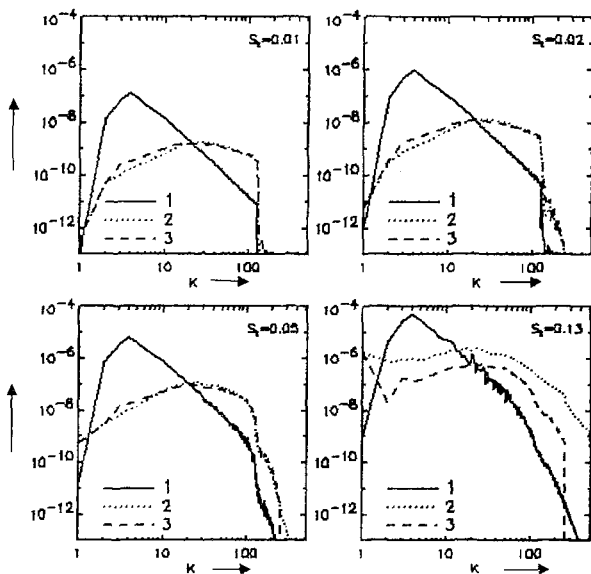


Рисунок 4 – Сопоставление локального потока импульса  $|ph_x|$  с локальной крутизной  $|h_x|$ . Получено осреднением по 398 волновых записей.

Как видно, рассчитанный рост потока импульса с увеличением слона происходит гораздо быстрее, чем поток импульса рассчитанного на основе  $\beta$ -функции. Это означает, что величина коэффициента сопротивления зависит от повторяемости крутых волн. Эта особенность чётко проявляется в спектре волнового сопротивления показанного на рисунке 5.



кривая 1 – волновой спектр

2 – спектр поверхностного давления рассчитанный по модели

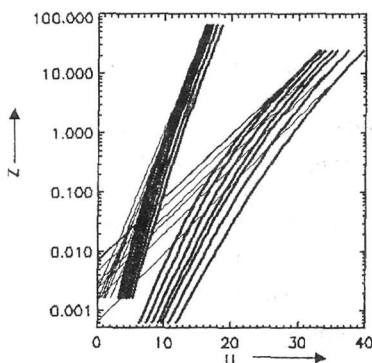
3 – спектр поверхностного давления рассчитанный с использованием  $\beta$ -функции для различных значений интегральной крутизны

Рисунок 5 – Спектр волнового сопротивления

Вертикальные профили Фурье-компонент волнового потока импульса нормализованных их поверхностными значениями являются четко организованными функциями безразмерной высоты  $kz$ . Эта функция использована для создания одномерной модели, которая берёт на себя многие функции двумерной модели, но оказывается неизмеримо проще. Если число мод заданных для расчёта потока импульса к волнам достаточно велико, его величина приближается к полному потоку импульса в ВПС. И всё же величина окончательной доли волнового потока импульса не имеет особого значения. Во-первых, она является быстро меняющейся функцией высоты, а во-вторых, высокочастотная часть потока импульса поступает к нестационарным и короткоживущим волнам, которые передают импульс

течениям на малых масштабах времени. Поэтому, при конечном числе мод влияние подсеточных мод может быть принято во внимание соответствующей модификацией локального коэффициента трения. Таким образом, если волны в модели описываются непосредственно, коэффициент шероховатости приобретает спектральные свойства.

В противоположность турбулентному трению, волновое трение не является внутренним свойством потока – оно создаётся взаимодействием с препятствиями – волнами, что и является специальным свойством ВПС. Благодаря волновому сопротивлению профиль ветра в нижней части ВПС существенно отклоняется от логарифмического (см рисунок 6).



*В каждой группе жирные линии соответствуют значениям  $U_{10}/c_p = 0.855, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 3.0$ . Для левой группы  $13.4 < U_{10} < 15.4$ , а для правой -  $29.5 < U_{10} < 36.3$ . Тонкие линии показывают логарифмический профиль ветра экстраполированный из внешней области ВПС.*

*Рисунок 6 – Профили ветра.*

Заметим, что для получения средних профилей, осреднение проводилось в следящей системе координат. Такое осреднение не вошло пока в практику измерений, поскольку оно трудно осуществимо. В связи с этим нужно заметить, что следящие координаты отвечают существу дела. Рассмотрение взаимодействия волн и ветра в прямоугольной системе координат подобно, например, рассмотрению летающего аппарата, чья форма для удобства аппроксимирована параллелограммом. Тем не менее, М. Донелан уже инициировал создание такой отслеживающей техники.

Одномерная модель, созданная на основе трёхмерной позволяет исследовать бесчисленное множество проблем и в том числе самые

традиционные – такие как зависимость коэффициента трения  $C_{10}$  от скорости ветра  $u_{10}$  (см, рисунок 7).

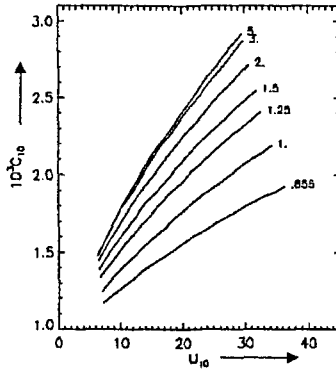


Рисунок 7 – Коэффициент трения  $C_{10}$  как функция  $U_{10}$  и  $U_{10}/c_p$   
(цифры на кривых)

Показано, что большой разброс экспериментальных данных о  $C_{10}$  может быть объяснен дополнительной зависимостью от формы спектра. Такой же эффект ясно выражен для параметра шероховатости нормированного масштабом Чарнока (см, рисунок 8).

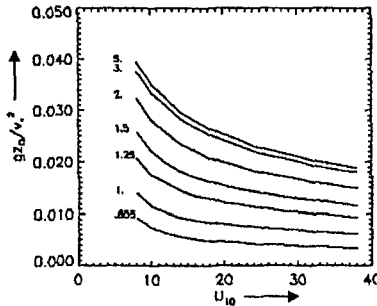
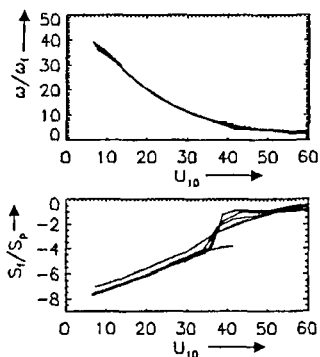


Рисунок 8 – Безразмерный параметр шероховатости

Главный механизм формирования коэффициента сопротивления сосредоточен в высокочастотной части спектра. Поэтому понижение коэффициента трения  $C_{10}$  при большой скорости ветра может быть вызвано подавлением высокочастотных волн начиная с некоторой частоты  $\omega_j$  (см, рисунок 9).



*a* – отношение частоты пика  $\omega_p$  к частоте 'обнуления'  $\omega_f$ ; *b* – отношение спектральной плотности  $S_f(\omega_f)$  к спектральной плотности в волновом пике  $S_p$  (логарифмическая шкала).

Рисунок 9 – Параметры характеризующие подавление высокочастотных волн

Наиболее вероятный механизм сглаживания морской поверхности связан, возможно, с пеной, генерируемой опрокидывающимися волнами. Несмотря на то что  $\omega_f$  во много раз превышает частоты пика энергия отброшенных волн очень мала, эффект сглаживания оказывается очень сильным: начиная со скорости ветра 25-30 м/с коэффициент трения понижается так же как это было зафиксировано в некоторых наблюдениях (см, рисунок 10).

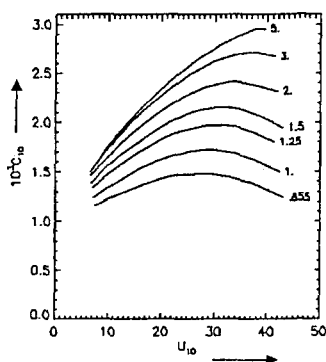


Рисунок 10 – Коэффициент сопротивления  $C_{10}$  как функция  $U_{10}$  и  $\Omega = U_{10}/c_p$  (цифры на кривых), рассчитанный с учётом подавления высокочастотных волн.

Эти результаты не претендуют на количественную точность. Они лишь указывают возможный механизм понижения коэффициента трения в штормовых условиях. Количественное исследование этого механизма

возможно при получении более или менее точных данных о высокочастотной области волнового спектра при сильных ветрах.

### Основные выводы исследования

- разработанная ранее Д.В. Чаликовым модель модифицирована для специальных исследований физики взаимодействия волн и ветра;
1. Проведены расчеты, иллюстрирующие сильное влияние формы волн на создаваемое ими сопротивление. Показано, что заострение волн может значительно увеличить коэффициент трения.
  2. Проведены расчёты долгопериодной эволюции взаимосвязанных пограничного слоя атмосферы и волнового поля. Показано, что приток волновой энергии и её диссипация обладают свойством перемежаемости: оба процесса интенсифицируются при росте крутизны волн.
  3. Исследована вертикальная структура Волнового Пограничного Слоя: давления, энергии волновых флуктуаций и вертикального волнового потока импульса, создаваемого полем скорости, давлением и флуктуациями напряжений.
  4. На основе полученных закономерностей с двумерной моделью, построена одномерная модель Волнового Пограничного Слоя.
  5. На основе одномерной модели ВПС исследована зависимость сопротивления от формы спектра. Показано, что коэффициент сопротивления сильно зависит от возраста волны.
  6. Предложена качественная гипотеза объясняющая падение коэффициента сопротивления при сильном ветре за счёт подавления высокочастотной части спектра.

### Список основных работ по теме диссертации

1. Раинчик С.Е Аналитическое решение вертикальной структуры общей циркуляции атмосферы [Text] /С.Е. Раинчик// Естественные и технические науки. – 2010 № 1
2. Раинчик С.Е Взаимодействие воздушного потока с линейными волнами [Text]/С.Е. Раинчик// Естественные и технические науки. – 2010 №2
3. Раинчик С.Е Взаимодействие воздушного потока с волнами Стокса [Text]/С.Е. Раинчик // Естественные и технические науки. – 2010 № 3 (в печати)
4. D. Chalikov, Coupled Numerical Modeling of Wind and Waves and theory of the boundary layer [Text]/ D. Chalikov, S. Rainchik. /Boundary Layer Meteorology(в печати)



Отпечатано с готового оригинал-макета в ЦНИТ «АСТЕРИОН»  
Заказ № 124. Подписано в печать 13.05.2010 г. Бумага офсетная  
Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз.  
Санкт-Петербург, 191015, а/я 83, тел. /факс (812) 275-73-00, 970-35-70  
asterion@ asterion.ru