Отчет о выполнении проекта № 15-17-20009

«Исследование физической природы и разработка теоретических моделей атмосферного пограничного слоя над неоднородной подстилающей поверхностью для нужд высокоразрешающего моделирования погоды, климата и качества воздуха» в 2018 году

1.1. Заявленный в проекте план работы на год. Формируется в соответствии с заявкой на участие в конкурсе.

Поскольку реализация проекта запланирована на один год, то план научных работ на 1-й год совпадает с планом работ по проекту, представленным в разделе 4.4.

1. Исследование влияния пены на процессы обмена в приводном слое атмосферы.

1.1. Проведение серии модельных экспериментов на ВВТСБ по исследованию влияния пены на процессы теплообмена в приводном атмосферном пограничном слое над водной поверхностью. Сравнение с ранее полученными результатами

1.2. Разработка алгоритмов обработки изображений пены на поверхности воды для определения размеров пузырьков и границ областей, покрытых пеной.

1.3. Разработка новой модели турбулентной вязкости, учитывающей вклад пены в шероховатость подстилающей водной поверхности, на основе полученных эмпирических данных о средних размерах пузырьков и площади покрытия.

1.4. Проведение численных расчетов в рамках квазилинейной модели турбулентного пограничного воздушного слоя с использованием новой вихревой вязкости. Сравнение результатов моделирования с данными экспериментов для чистой воды и полученными при искусственном пенообразовании.

Изучение влияния солености воды на процессы обмена в приводном слое атмосферы.
Выполнение специальных тестовых экспериментов по подбору параметров раствора бутанола-1 в пресной воде, моделирующего эффекты, связанные с образованием и динамикой пузырьков в приповерхностном слое в морской соленой воде.

2.2. Проведение серии модельных экспериментов на ВВТСБ с использованием растворов бутанола-1 по исследованию влияния солености на процессы обмена импульсом в приводном атмосферном пограничном слое над морской поверхностью. Сравнение с ранее полученными результатами исследований для пресной воды.

3. Моделирование и параметризация процессов переноса в пограничных слоях 3.1. Создание балк-модели конвективного ППС, реалистически воспроизводящей его толщину как функцию времени и турбулентные потоки плавучести и количества движения на его верхней границе.

3.2. Модификации имеющегося алгоритма DNS и проведение прямого численного моделирования неустойчиво стратифицированного атмосферного погранслоя над взволнованной водной поверхностью.

3.3. Создание модели и разработка параметризации скорости диссипации турбулентной энергии в стратифицированном турбулентном сдвиговом потоке.

3.4. Вывод аналитических выражений для напряжения трения на подстилающей поверхности для устойчивых ППС на основе асимптотического анализа законов сопротивления и вихреразрешающего моделирования.

4. Исследование влияния формы шероховатостей поверхности на процессы обмена4.1 Разработка алгоритма и проведение прямого численного моделирования процессов обмена в атмосферном погранслое в присутствии паразитной капиллярной ряби на энергонесущих поверхностных волнах.

4.2. Проведение прямого численного моделирования (DNS) взаимодействия пограничного слоя с шероховатыми поверхностями для получения эмпирической информации о механизмах переноса тепла и количества движения в вязком и буферном слоях и в слое шероховатости.

4.3. Интерпретация результатов DNS в терминах параметров шероховатости для количества движения, тепла и пассивных примесей.

5. Изучение влияние термического режима водоема на процессы обмена в пограничных слоях воды и воздуха 5.1. Адаптация модели Lake, предназначенной для моделирования температурных режимов внутренних водоемов, под условия Горьковского водохранилища. Подготовка метеоданных о параметрах ветра, солнечной радиации, температуры воздуха и т.д., для проведения моделирования процессов за временной интервал 2014-2017 гг. 5.2. Сопоставление результатов моделирования Lake с результатами натурных измерений распределения температуры в период 2014-2017 гг. Модификация модели.

6. Применение модели волнения на внутреннем водоеме для случая прибрежной зоны 6.1. Верификация адаптированной модели WAVEWATCH III на основе данных о параметрах волнения в акватории Финского залива полученных по наблюдениям с научных буев в период 2012-2016 г.

Планируемые на первый год содержание работы руководителя проекта и каждого основного исполнителя проекта

Зилитинкевич С.С. – общее руководство проектом, откалиброванная и верифицированная версия новой теории замыкания различных уровней сложности. Подготовка публикаций, подготовка научного отчета.

Троицкая Ю.И. - разработка теоретических моделей взаимодействия воздушного потока с подстилающей поверхностью, подготовка публикаций.

Дружинин О.А. – численная модель стратифицированного турбулентного ветра над взволнованной водной поверхностью, подготовка публикаций.

Сергеев Д.А. – постановка и организация лабораторных экспериментов на высокоскоростном ветро-волновом канале по исследованию приводного ветрового пограничного слоя. Разработка контактных и дистанционных методов измерения параметров приводного слоя атмосферы и морской поверхности, подготовка публикаций.

Запланированные командировки по проекту

1. Генеральная Ассамблея Европейского Геофизического Союза, Вена, Австрия, 8.04.18 - 13.04.18 О.А.Дружинин., Троицкая Ю.И.

2. WISE-2018, Израиль, 20-25 апреля 2018, Кузнецова А.М., Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А., Кандауров А.А.

3. WAVEWATCH - tutorial, Брест, Франция, июнь 2018, Кузнецова А.М.

4. Школа "Нелинейные волны", Нижегородская область, 26 февраля - 3 марта, Кузнецова А.М., Троицкая Ю.И., Сергеев Д.А., Зотова А.Н.

1.2. Заявленные научные результаты на конец года

Поскольку реализация проекта запланирована на один год, то ожидаемые в конце первого года конкретные научные результаты совпадают с ожидаемыми результатами работ по проекту, представленным в разделе 4.4.

1. Исследование влияния пены на процессы обмена в приводном слое атмосферы.

1.1. Будут получены значения параметра температурной шероховатости и коэффициента обмена теплом в условиях контролируемого искусственного пенообразования на водной поверхности. Сопоставление зависимости этих параметров от эквивалентной скорости ветра с ранее полученными аналогичными результатами для пресной воды позволит сделать выводы о влиянии пены на процессы теплообмена.

1.2. Новые алгоритмы обработки изображений водной поверхности с пеной позволят найти распределения по размерам пузырьков и относительную площадь покрытия ими во всем диапазоне исследуемых скоростей ветра для случая пресной воды и при искусственном пенообразовании.

1.3. Будет разработана новая модель турбулентной вязкости, учитывающая вклад пены в шероховатость подстилающей водной поверхности, на основе полученных эмпирических данных о средних размерах пузырьков и площади покрытия.

1.4. Квазилинейная модель будет обобщена для возможности учета вклада пены в шероховатость и обмен импульсом между атмосферой и гидросферой. Верификация на основе экспериментальных данных позволит определить коэффициенты в модели турбулентной вязкости

2. Изучение влияния солености воды на процессы обмена в атмосфере

2.1. В рамках специальных тестовых экспериментов будут подобраны параметры раствора бутанола-1, позволяющие моделировать эффекты, связанные с образованием и динамикой пузырьков в приповерхностном слое в морской соленой воде.

2.2. Будут получены зависимости турбулентного потока импульса и коэффициента аэродинамического сопротивления от эквивалентной скорости ветра в лабораторных экспериментах на ВВТСБ по моделированию ветро-волнового взаимодействия с учетом влияния солености. Сопоставление с ранее полученными результатами для пресной воды позволят сделать выводы о влиянии солености на процесс обмена импульсом.

3. Моделирование и параметризация процессов переноса в пограничных слоях

3.1. Будет создана балк-модель конвективного ППС, реалистически воспроизводящая его толщину как функцию времени и турбулентные потоки плавучести и количества движения на его верхней границе.

3.2 Будет проведено прямое численное моделирование неустойчиво-стратифицированного атмосферного пограничного слоя над взволнованной водной поверхностью. Будет изучено взаимовлияние когерентных вихревых структур, развивающихся в атмосферном погранслое при неустойчивой стратификации воздуха. С учетом данных численного и лабораторного моделирования будут предложены параметризации турбулентных потоков в стратифицированном атмосферном погранслое над взволнованной водной поверхностью для использования в крупномасштабных климатических моделях.

3.3. С использованием уравнения баланса ТКЭ, эмпирических данных и результатов прямого численного моделирования будет создана модель и разработана параметризация

скорости диссипации турбулентной энергии в стратифицированном турбулентном сдвиговом потоке.

3.4. На основе асимптотического анализа законов сопротивления и вихреразрешающего моделирования будут получены аналитические выражения для напряжения трения на подстилающей поверхности для устойчивых ППС.

4. Исследование влияния формы шероховатостей поверхности на процессы обмена

4.1. Будет проведено численное моделирование атмосферного воздушного погранслоя над взволнованной водной поверхностью с учетом «паразитной» капиллярной ряби.

4.2. Будет исследовано влияния ряби на динамику турбулентности в воздушном погранслое и на процессы обмена теплом и импульсом между атмосферой и гидросферой.

4.3. Будет предложена интерпретация результатов DNS в терминах параметров шероховатости для количества движения, тепла и пассивных примесей.

5. Изучение влияние термического режима водоема на процессы обмена в пограничных слоях воды и воздуха

5.1. В адаптированной модели Lake будет использоваться новая нелинейная балк-формула (полученная на основе измерений на Горьковском водохранилище) для параметризации сдвигового напряжения на границе раздела. Это позволит более точно моделировать процессы перемешивания и формирования температурного распределения.

5.2. Для выполнения расчетов с помощью Lake будет создан массив входных данных о состоянии приводного слоя атмосферы над Горьковским вдхр. с высоким разрешением по времени (не более 6 часов) за период 2014-2017 гг., на основе данных реанализа и наблюдений ближайших метеостанций.

5.3. Результаты, полученные при верификации Lake, позволят улучшить точность прогнозов с ее помощью и в дальнейшем объединить WAVEWATCH III, WRF и Lake в рамках прототипа модели микроклимата и локальной погоды природного ландшафта, содержащего внутренний водоем.

6. Применение модели волнения на внутреннем водоеме для случая прибрежной зоны

6.1 Верификация адаптированной модели WAVEWATCH III на основе данных о параметрах волнения в акватории Финского залива, полученных по наблюдениям с научных буев в период 2012-2016 гг.

1.3. Сведения о фактическом выполнении плана работы на год (фактически проделанная работа, до 10 стр.)

1. Исследование влияния пены на процессы обмена в приводном слое атмосферы.

Исследование влияния пены на процессы обмена в приводном слое атмосферы были начаты с проведения модельных экспериментов на Ветро-волновом Термостратифицированном бассейне (ВВТСБ) ИПФ РАН. Основное внимание в этой серии уделялось исследованию теплообмена. В ходе работ создавалась и поддерживалась разность температуры воды и воздуха за счет нагрева последнего (30-40 градусов) до поступления в рабочую часть над водой (15 градусов). Для моделирования влияния пены использовалась система искусственной пеногенерации. Специальное устройство пеногенератор, позволят создавать мелкопузырьковую (мелкодисперсионную) пену за счет применения сжатого воздуха из специального раствора пенообразующего вещества (основным компонентом которого является лаурилсульфат натрия). В ходе экспериментов уровень раствора вещества и давления сжатого воздуха не менялись, поэтому можно говорить о постоянном расходе пены.

Профили средней скорости и температуры измерялись сканирующим методом с помощью совмещенных трубки Пито и пленочного термоанемометра соответственно. Параллельно с измерениями параметров воздушного потока выполнялись измерения параметров поверхностного волнения с помощью трехканального струнного волнографа и применения FDM метода для нахождения 3D-спектров волнения (частота, волновое число, угол распространения).

Для каждой скорости ветра измерения проводились для следующих ситуаций: 1) чистая вода; 2) чистая вода с подачей сжатого воздуха в систему пеногенерации, но без подачи пенообразующего вещества (для контроля возможных возмущений со стороны работающего пеногенератора как такового); 3) при полностью функционирующей системе пеногенерации; 4) при полностью функционирующей системе пеногенерации с использованием половиной концентрации пенообразующего вещества; 5) чистая вода в условиях стратификации (горячий воздух над холодной водой) для изучения теплообмена; 6) при полностью функционирующей системе пеногенерации в условиях стратификации (горячий воздух над холодной водой) для изучения.

После этой серии экспериментов были выполнены аналогичные измерения с половинной концентрацией пенообразующего вещества.



Рис. 1. Схема экспериментов 1) Рама ВВТСБ (2) стойки канала (3) расширяющесужающая секция с хонейкомбом (4) волногаситель (5) термоанемометр (6) трубка Пито и термоанемометр, закрепленные на сканирующем устройстве (7) трехканальный струнный волнограф (8) камера съемки вида сверху (9) подводный светильник (10) резервуар с пенообразующим раствором. Размеры приведены в сантиметрах

При проведении измерений пена поступала на поверхность непрерывно, с постоянным расходом. Перед каждой серией измерений и после нее контролировались параметры воды в бассейне с целью выяснения вопроса влияния пенообразующего вещества на свойства воды. Измерялся коэффициент поверхностного натяжения капельным способом, а также вязкость жидкости с помощью вязкозиметра. Во всех случаях отличия от первоначальных значений этих параметров находились в пределах погрешности измерений. Таким образом, исключалось изменение физических свойств собственно воды в самом бассейне, а, следовательно, и возможное паразитное влияние на ветро-волновое взаимодействие.

Максимальная скорость ветра в проводимых экспериментах была ниже, чем в выполненных ранее аналогичных исследованиях влияния пены на обмен импульсом.

Причина этого заключалась в сильной чувствительности термоанемометра при попадании брызг, что затруднило проведение измерений при сильных ветрах. Частота вращения нагнетающего центробежного вентилятора изменялась в диапазоне 20-35 Гц, что позволило обеспечить диапазон эквивалентных (пересчитанных на высоту 10 м) скоростей воздушного потока U₁₀ от 12 до 24 м/с. Измерения были выполнены при четырех разных скоростях ветра в канале.

Всего для каждой скорости ветра в канале измерено по 2 профиля скорости и температуры для каждой конфигурации эксперимента. С использованием ранее разработанной теории автомодельности профилей скорости и температуры были найдены значение скорости трения u^* , эквивалентной скорости воздушного потока на 10-м высоте U_{10} , коэффициент аэродинамического сопротивления (обмена импульсом) C_D , параметр температурной шероховатости $T^*/\Delta T_{10}$ и коэффициента теплообмена C_T , который является произведением температурной шероховатости и корня квадратного из коэффициента сопротивления. По данным временных записей (также 2 по 20 минут) возвышений поверхности с использованием FDM методов вычислены спектры, найдены средние амплитуды и уклон волнения, пиковые частоты и волновые числа (соответствующие пикам в спектрах). Были построены зависимости коэффициентов обмена и параметров волнения от эквивалентной скорости возранализированы.



Рис.2. Профили средней скорости (а) и температуры (б) ветра в канале в экспериментах по исследованию влияния пены (красные символы пена, черные чистая вода)

Параллельно с измерениями характеристик воздушного потока и параметров волнения разработана система измерения характеристик пены (площадь покрытия, распределение пузырьков, определение среднего размера и дисперсии). Данные получены на основе специальной обработки изображений поверхности, полученных съемкой сверху и теневой подсветкой из-под воды. Стадии обработки включали в себя вычитание фона, бинаризацию, морфологический анализ



Рис.3. а) Исходное изображение б) Вычитание фона и инверсия в) Бинаризация по порогу 50 г) Морфологическое замыкание по диску 5 рх д) Закрашивание ограниченных областей е) оно же, наложенное на исходное изображение:

Полученные данные использовались для разработки новой модели турбулентной вязкости, учитывающей вклад пены в шероховатость подстилающей водной поверхности, которая в свою очередь использовалась в модели пограничного слоя атмосферы над взволнованной поверхностью воды (подробное описание см. [Troitskaya, et al., 2012]). Модель основана на уравнениях RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), замкнутых в соответствие с гипотезой Буссинеска. Чтобы избежать сильной геометрической нелинейности, уравнения RANS формулируются в волноводных криволинейных координатах. Входными параметрами модели являются скорость трения в турбулентном пограничном слое и трехмерное волновое число - частотно-угловой спектр поверхностных волн. Здесь эти параметры измеряются. Выходные параметры - скорость ветра на высоте 10 м и коэффициент сопротивления поверхности воды. Эти значения измеряются независимо и могут использоваться для проверки модели. Расчеты этой модели сопоставлялись с результатами измерений.

Список литературы

Troitskaya Yu.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 // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2012. V.117. C00J21. 2. Изучение влияния солености воды на процессы обмена в приводном слое атмосферы.

Для изучения влияния солености воды на процессы обмена в приводном слое атмосферы вначале были выполнены специальные тестовые эксперименты по подбору параметров раствора бутанола-1 в пресной воде, моделирующего эффекты, связанные с образованием и динамикой пузырьков в приповерхностном слое в морской соленой воде.

Известно, что в соленой воде при обрушении, микропузырьки остаются намного дольше чем в пресной за счет того, что они не слипаются друг с другом, образуя более крупные пузырьки, которые вплывают значительно быстрее. К аналогичным эффектам может приводить и добавление в микроконцентрациях 1-бутанола С4Н9ОН в воду. Это вещество, обладая достаточно длинной полярной молекулой, является поверхностно активным, а с другой стороны еще неплохо растворяется в воде (7.6 г/литр), образуя азеотроп. Необходимо было определить, в каких концентрациях необходимо использовать бутанол, чтобы условия соответствовали соленой воде в 35 промилей (среднее значение для мирового океана). Для этого были выполнены специальные эксперименты, в которых теневым методом измерялась временная динамика концентрации пузырьков в жидкости при различных концентрациях бутанола от 12 до 1000 мг/литр в сравнении с солевым раствором, в небольшом прозрачном аквариуме после быстрого залива сверху жидкости фиксированного объема (из стакана в аквариум). Они позволили определить оптимальную концентрацию растворов бутанола (всего 37 мг/литр), соответствующую условиям соленой морской воды в целях моделирования процессов обрушения и генерации подводных пузырьков, и образовании пены при моделировании ураганных ветров в лабораторных условиях.



Рис.4. Спадание интенсивности изображения жидкости с пузырьками: 1 – чистая вода, 2 – 12 мг/л бутанола, 3 – 24 мг/л, 4 – 40 мг/л, 5 – 103 мг/л, 6 – 300 мг/л, 7 – около 1000 мг/л (3 записи), 8- соленая вода 35 г/л (35 промилле как в среднем по океанам), 9- соленая вода 18 г/л.

После этого выполнялись лабораторные эксперименты с данным раствором бутанола на ВВТСБ по исследованию влияния солености на процессы обмена импульсом в приводном атмосферном пограничном слое над морской поверхностью и сравнивались результаты с пресной водой. Исследования проводились в широком диапазоне скоростных режимов воздушного потока. Частота работы вентилятора варьировалась в диапазоне от 20 до 45 Гц шагом 5 Гц. Выполнялось профилирование воздушного потока над взволнованнной поверхностью в седьмой рабочей секции на расстоянии 6.5 м от начала канала. Для профилирования использовались трубка Пито с прецизионным дифманометром MKS Baratron и термометр (для учета температуры при компенсации изменения плотности для пересчета давления в скорость), установленные на едином сканирующем устройстве. С использованием теории автомодельности дефекта профиля скорости в ветро-волновом канале, была найдена эквивалентная скорость ветра, скорость трения и коэффициент аэродинамического сопротивления (коэффициент обмена импульсом). Выбранный диапазон соответствовал изменению эквивалентной скорости ветра при пересчете на высоту 10 м от 12 до 34 м/с. Параллельно с контактными измерениями характеристик воздушного потока контролировались характеристики взволнованной водной поверхности. Возвышения поверхности измерялись антеннами струнных волнографов, а обработка данных FDM-методом позволяла восстановить 3D спектры (частота, волновое число, направление).

3. Моделирование и параметризация процессов переноса в пограничных слоях

На основе уравнения баланса для кинетической энергии турбулентной конвекции, генерируемой как за счет сил плавучести – конвективный механизм, так и за счет сдвига скорости – механическая генерация, получено уравнение интегрального баланса конвективного ППС (изменения высоты конвективного слоя h) с учетом потока плавучести Fh+0на верхней границе конвективного слоя (h-l < z < h). Предполагается, что конвективный слой развивается на фоне устойчиво стратифицированной среды; при этом поток Fh+0 обеспечивается внутренними гравитационными волнами $(B\Gamma B),$ возбуждаемыми восходящими конвективными струями в слое вовлечения l. Согласно линейной теории поток энергии, переносимой за счет ВГВ, определяется амплитудой а, квадратом длины внутренней волны, а также стратификацией среды N в третьей степени. Естественным масштабом амплитуды *а* внутренних гравитационных волн, возбуждаемых конвективными струями, служит толщина слоя турбулентного вовлечения *l*. В присутствии сдвига скорости (т.н. механический источник конвективной турбулентности) в свободной атмосфере можно ожидать существенного увеличения потока энергии, переносимой ВГВ, за счет особенностей их взаимодействия со сдвиговыми потоками в критических слоях. Под влиянием сдвига скорости в атмосфере развиваются цилиндрические организованные структуры, охватывающие по вертикали весь конвективный слой, вытянутые вдоль ветра и вращающиеся в вертикальной плоскости, перпендикулярной направлению ветра. Типичное расстояние между структурами составляет удвоенную высоту конвективного слоя *h*. Поэтому для ВГВ, возбуждаемых этими структурами, типичная длина волны определяется высотой всего конвективного слоя, а амплитуда а определяется толщиной слоя вовлечения, в пределах которого h-l < z < hвблизи верхней границы поток плавучести отрицателен, т.е. направлен вниз. Масштаб толщины этого слоя *l* выражается через подлежащий определению коэффициент вовлечения А, равный отношению потоков плавучести на верхней границе растущего конвективного слоя Bh и потока плавучести на подстилающей поверхности Bs.

В рамках модели полного перемешивания конвективного ППС получено уравнение для определения коэффициента турбулентного вовлечения А: A+C4*Ri^3/2(A/(1+A))^2=C1-C2*E+C5(V*/W*) ^3. Константы C1=0.2 и C2=0.8 определены с помощью лабораторных экспериментов по конвекции в двухслойной жидкости (в которых член V_{*} и члены, содержащие Ri, в уравнениях обращаются в нуль, так что эти уравнения полностью совпадают). Новые константы С4 и С5 предстоит определить по данным атмосферных экспериментов и вихреразрешающего моделирования. При этом для определения С4 удобно использовать данные, относящиеся к чисто конвективным слоям, а для определения C5 – данные, относящиеся к конвективно-механическим слоям при сильных ветрах. Кроме того, в конвективно-механических слоях одного конвективного масштаба скорости $Ws = (Bs*h)^{1/3}$ недостаточно. Для определения механического масштаба скорости V* естественно воспользоваться удвоенной скоростью механической генерации ТКЭ: $2Uu^{*}2$ и принять V*= $(2Uu^{*}2)^{1/3}$, где U – средняя по вертикали скорость ветра в конвективном слое. При этом из уравнения для определения А следует, что для нейтрального или слабо стратифицированного остаточного слоя (Ri << 1), уравнение для коэффициента турбулентного вовлечения принимает вид dh/dt=W*(C1+C5(V*/W*)^3-А)/С2, что соответствует стремительному росту h. В случае же, когда конвективный слой проникает в устойчиво стратифицированную свободную атмосферу (где *Ri>>1*), рост слоя резко замедляется.

Разработан алгоритм и проведено прямое численное моделирование неустойчивостратифицированного атмосферного погранслоя над взволнованной водной поверхностью (Рис. 5). Проведен статистический анализ и осреднение по ансамблю мгновенных полей скорости и температуры для различных значений балковых параметров (скорости и температуры) воздушного потока и крутизны поверхностных волн. Проведено сравнение средних вертикальных профилей, полученных в результате статистической обработки данных численных экспериментов, с предсказанием известных моделей прогноза атмосферного погранслоя над водной поверхностью.



Рис. 5. Схема численного эксперимента.

На основе обобщения данных прямого (DNS) и вихреразрешающего (LES) численного моделирования проведена параметризация уравнения для турбулентной кинетической энергии (ТКЭ) в атмосферном пограничном слое над водной поверхностью в широком диапазоне метеоусловий, в том числе при сильной устойчивой стратификации для отношения высоты погранслоя к масштабу Обухова, z/L, z/L >> 1. Получены универсальные зависимости потокового числа Ричардсона (Ri_f) и скорости диссипации ТКЭ от z/L (Рис. 6,7). Для нестационарного режима введена релаксационная функция, параметризуемая на основе DNS/LES данных. В результате получено универсальное

уравнение для ТКЭ, пригодное для описания атмосферного погранслоя в широком диапазоне метеоусловий, в том числе при сильной устойчивой стратификации для z/L >> 1.





Рис. 6. Сравнение зависимости потокового числа Ричардсона, Ri_f, от высоты погранслоя, *z/L*, в численных экспериментах DNS (серые, синие и красные точки, получены для разных экспериментов) с предсказанием теоретической модели с параметризацией на основе численных данных.

Рис. 7. Зависимость скорости диссипации $K \ni T$ от z/L (обозначения те же).

Список литературы

Зилитинкевич С.С., Тюряков С.А., Троицкая, Мареев Е.А.Теоретические модели высоты пограничного слоя атмосферы и турбулентного вовлечения на его верхней границе // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2012, том 48, № 1, с. 150-160.

4. Исследование влияния формы шероховатостей поверхности на процессы обмена

Разработан алгоритм и проведено прямое численное моделирование (DNS) процессов обмена в воздушном погранслое в присутствии паразитной капиллярной ряби на энергонесущих поверхностных волнах. Проведен статистический анализ и осреднение по ансамблю мгновенных полей скорости и температуры воздушного потока для различных форм возвышения водной поверхности и параметров ряби и энергонесущих волн, наблюдаемых в численных экспериментах ((Hung & Tsai, JPO 39, 2009) (Puc.8). Исследованы механизмы переноса тепла и количества движения в вязком и буферном слоях и в слое шероховатости. Результаты DNS интерпретированы в терминах параметров шероховатости профилей средних полей.



Рис.8. Мгновенное поле модуля завихренности в центральной плоскости (x,z) в DNS для различных форм возвышений водной поверхности, наблюдаемых в численных экспериментах (Hung & Tsai, JPO, 2009).

Список литературы

L.-P. Hung, Wu.-T. Tsai. The Formation of Parasitic Capillary Ripples on Gravity–Capillary Waves and the Underlying Vortical Structures // Journal of Physical Oceanography, 2009. DOI: 10.1175/2008JPO3992.1

5. Изучение влияние термического режима водоема на процессы обмена в пограничных слоях воды и воздуха

В ходе работ в рамках проекта модель LAKE, предназначенная для расчета температурных режимов внутренних водоемов, была адаптирована под условия Горьковского водохранилища и существенно модернизирована.

В модели LAKE в качестве входных данных для расчета временной эволюции профиля температуры используются: стартовый температурный профиль, начальные (неизменяющиеся в ходе расчета) характеристики (параметры численной схемы, глубина водоема, характеристики грунта: тип и толщина, постоянные коэффициенты в уравнениях), а также таблицы данных метеорологической обстановки, характеризующих изменение условий на верхней границе в течение всего периода счета.

В исходной версии, стартовый температурный профиль задавался с помощью трех точек, определяемых значением температуры на поверхности, на нижней границе перемешанного слоя и на границе вода-грунт: при этом учитывались только полная глубина водоема и толщина перемешанного слоя. Это ограничивало возможности по заданию в качестве стартовых профилей близких к реальным, особенно в случае наличия скачков температуры, т.н. «термоклинных профилей». В работе проведена модернизация численной схемы, которая позволила задавать начальный профиль температуры набором значений с произвольным шагом по глубине на основе реально измеренных данных на различных глубинах. Программа работает итерационно: профиль, полученный на выходе на каждом шаге вычислений, используется как входной на следующем шаге. Шаг по времени составлял 1 минуту.

Задаваемые метеоданные для расчета граничных условий включают в себя временные зависимости температуры воздуха, атмосферного давления, удельной влажности воздуха, скорости выпадения осадков, интенсивность солнечной радиации и встречного излучения атмосферы, а также компоненты скорости ветра. В большинстве работ, посвященных моделированию термодинамики водных объектов, в качестве входных данных метеорологической обстановки используются результаты специальных натурных измерений, что требует наличия постоянно функционирующей аппаратуры. В то же время стандартные текущие наблюдения, выполняемые на станциях и постах Гидрометцентра, расположенных на берегу (в случае Горьковского водохранилища это Волжская ГМО г. Городец и станция в г. Юрьевец), могут не отражать реальной обстановки непосредственно на водоеме. На средних и небольших водоемах таких измерений может вообще не проводиться. Поэтому представляется перспективным использование данных глобального метеорологического реанализа, имеющихся в настоящее время в открытом доступе. Для используемого стандартного реанализа NCEP интервал изменения метеоданных по времени составляет 6 часов, а пространственное разрешение 0.5°х0.5°. На основе сравнения результатов многочисленных измерений, выполненных с 2014 по 2017 гг. с соответствующими данными реанализа, был получен поправочный коэффициент (равный 1.5), на который необходимо умножать значения скорости ветра, полученные из реанализа.



Рис.9. Сопоставление данных натурных измерений скорости ветра и данных реанализа NCEP/NCAR.

Скорость ветра критически важна с точки зрения влияния на перемешивание в приповерхностном слое и формировании температурного распределения в этой области. Остальные данные реанализа (температура и влажность воздуха, атмосферное давление, падающая солнечная радиация и встречное излучение атмосферы) мы брали без дополнительной параметризации. В настоящих исследованиях для задания турбулентного потока импульса на границе была впервые использована параметрическая зависимость, полученная на основе выполненных ранее натурных измерений на полигоне Горьковского водохранилища с использованием уникального оборудования - вехи Фруда – была получена параметрическая зависимость турбулентного потока импульса от скорости ветра, учитывающая особенности подстилающей поверхности водоемов.

Важными параметрами, влияющими на результаты расчета температурных распределений, являются коэффициент генерации турбулентности за счет обрушения волн и коэффициент экстинкции (поглощения света). Используемые в расчетах значения экстинкции в диапазоне 2-2.5 м⁻¹ получены по результатам измерений глубины прозрачности воды диском Секки. Для подбора значения коэффициента турбулентности были выполнены специальные расчеты для нескольких его значений: наилучшее совпадение наблюдается при значении равном 10. В период 2014-2017 гг. ранее проводились комплексные экспедиционные работы на полигоне Горьковского водохранилища, в ходе которых были произведены измерения температурных профилей. Измерения выполнялись с помощью свободно падающего СТД-зонда, фиксирующего значения температуры с частотой 6 Гц. В ходе каждого выхода проводилось несколько измерений.

Для верификации результатов моделирования из массива данных по всем экспедициям были выбраны 2014 и 2017 года, поскольку эти сезоны характеризуются значительными отличиями в характере распределения температуры, что связано в первую очередь с сильными различиями в метеорологической обстановке, и для них имелось максимальное количество измерений.

6. Применение модели волнения на внутреннем водоеме для случая прибрежной зоны

В рамках проекта РНФ 15-17-20009 были получены результаты, послужившие основой для адаптации модели WAVEWATCH III (WW3) к условиям малых разгонов внутренних водоемов. Было сделано предположение об эффективности применения адаптированной модели в условиях малых разгонов прибрежных зон. Для проверки данного предположения были произведены расчеты в прибрежной зоне Финского залива около г. Хельсинки. Верификация расчетов проводилась на основе данных натурных измерений с буев, расположенных в прибрежной зоне Финского залива. Набор данных (Kahma и др., 2016) был собран в течение периода с 2012 по 2016 год.



Рис.10. Исследуемая акватория, Финский залив вблизи г.Хельсинки. Буй Suomenlinna обозначен красным цветом цифрой 1, метеостанции обозначены желтым цветом, цифра 2 – Нагтаја, цифрой 3 - Eestinluoto.

Для анализа качества расчетов оригинальной модели WW3 и предложенной адаптированной WW3 были выбраны два дня 01.10.16 - 02.10.16, когда ветер имел достаточную скорость и направление, обеспечивающее выполнение условия коротких разгонов. Распределение ветра на метеостанции Harmaja (60.103°, 24.975°) представлено на Рис.11 (слева), на метеостанции Eestinluoto (60.12455°, 25.22275°) - на Рис.11 (справа). Видно, что преобладает ветер с направления восток-северо-восток. Это соответствует разгону волн в интервале 10-30 км. Большой разброс в оценке разгона связан с изрезанностью береговой линии и большим малым углом ветра относительно берега. При наблюдаемых скоростях ветра это соответствует безразмерному разгону 500-10000, что значительно меньше характерных для полностью развитого волнения значений (25000 и более).



Рис.11. Распределение ветра на метеостанции Нагтаја (слева) и на метеостанции Eestinluoto (справа).

Были использованы измерения волнового буя Suomenlinna для изучения производительности и различия между оригинальной моделью WW3 и предложенной адаптацией к условиям коротких разгонов. Моделирование проводилось при подключении оригинальной параметризации ST1 и параметризации ST1 с измененным C_D. Все волновые модели были сконфигурированы с идентичной сеткой 0,1 морской мили (185 м) и задавались с неоднородным форсингом ветра модели HIRLAM. Для описания исследуемой акватории была использована прямоугольная сетка 281 × 241 с координатами левого нижнего угла 24.4666666°, 59.8666683°, шаги по направлениям составили 0.00333333° и 0.001666666° соответственно.

Список литературы

K.K. Kahma. Evidence of Energy and Momentum Flux from Swell to Wind // J. Phys. Oceanogr., 2016. https://doi.org/10.1175/JPO-D-15-0213.1

1.4. Сведения о достигнутых конкретных научных результатах в отчетном году

1. Исследование влияния пены на процессы обмена в приводном слое атмосферы

Для исследования в лабораторных условиях ВВТСБ влияния пены на процессы теплообмена между атмосферой и гидросферой с использованием метода профилирования, разработанная ранее теория автомодельности дефекта профиля скорости в настоящем исследовании была обобщена для профиля температуры воздушного потока в аэродинамическом канале над волнами. Профили температуры, построенные для новых безразмерных значений вертикальной координаты и температуры, демонстрируют автомодельный характер. Их аппроксимации в следной части погранслоя и слое постоянного потока погранслоя позволили получить значения автомодельных констант, значения которых для разных скоростей воздушного потока оказались близкими друг к другу (ближе, чем значения аналогичных коэффициентов для соответствующих профилей скорости). Были получены зависимости температурной шероховатости, коэффициента сопротивления, и коэффициента теплообмена (числа Стентона), который является комбинацией двух предыдущих. Показано, что на малых скоростях пена не влияет, затем при увеличении скорости ветра теплообмен начинает возрастать по сравнению с чистой водой, далее при максимальных скоростях ветра, когда начинается интенсивное обрушение волн и образование брызг, разница снова уменьшалась. Это наблюдается и для температурной шероховатости и для коэффициента теплообмена. Можно предположить, что пена эффективно увеличивает площадь, с которой происходит теплообмен по сравнению с чистой поверхностью воды, однако при больших скоростях ветра начинается обрушение волн с естественной генерацией пены и брызг, что приводит к уменьшению этого эффекта.



Рис. 12. Параметр температурной шероховатости и коэффициент теплообмена (число Стентона). НС - половинная концентрация пены, barhan - эксперименты с нагревом воздуха.

По результатам анализа изображений взволнованной поверхности было получено, что распределение по размерам пузырьков в пене хорошо описывается логнормальным распределением во всем диапазоне скоростей ветра, при этом средний размер пузырька уменьшается с ростом скорости ветра. Причина заключается в начале естественного обрушения волн при больших скоростях ветра. Для обоих случаев чистой воды и воды, покрытой искусственной пеной, зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от среднеквадратичного уклона поверхности оказываются близкими к линейным функциям с различными наклонами, зависящими от доли покрытия пеной. Для наших экспериментальных данных была найдена двойная линейная регрессия между коэффициентом сопротивления, среднеквадратичного уклона параметра доли покрытия поверхности пеной.

На основе полученных ранее результатов исследования влияния пены на процессы обмена импульсом и специальных экспериментов по измерению характеристик пены с помощью съемки сверху поверхности с теневой подсветкой из-под воды, была предложена новая модель турбулентной вязкости. Ранее (см. [Troitskaya et al., 2012]) использовалась автомодельная вихревая вязкость для турбулентного пограничного слоя с формулой Смольякова, предложенной на основе лабораторных экспериментов с турбулентным пограничным слоем над аэродинамически гладкой пластиной.

В настоящих исследованиях используется модельный коэффициент вихревой вязкости, учитывающий пену на поверхности воды. Для поверхности, свободной от пены, предполагается режим гладкого обтекания, а для поверхности, покрытой пеной, параметр шероховатости определяется через коэффициент отношения аэродинамической и геометрической шероховатости пены, который в свою очередь является функцией от среднего размера пузырька. Сначала проверялась применимость упрощенной модели для описания сопротивления формы аэродинамически гладкой волнистой поверхности воды, когда нет ни искусственной пены, ни естественной вызванной обрушениями волн. Были сопоставлены результаты расчетов коэффициента поверхностного сопротивления в квазилинейной модели для случая аэродинамически гладкого течения с использованием модели Смольякова и нашей новой модели. Спектры входной поверхностной волны были взяты из экспериментов. Показано, что для наших экспериментов упрощенная модель вихревой вязкости дает значения коэффициента поверхностного сопротивления очень близко к результатам более точной модели.



Рис.13. а) доля покрытия поверхности от скорости рения (черные - чистая вода, красные символы - с искусственной пеной) б) Распределение по размерам пузырьков и их аппроксимация логнормальной функцией в) зависимость среднего размера пузырька от скорости трения и линейная аппроксимация.

После проверки выполнялись расчеты для реальных случаев, в том числе с искусственной пеной. В качестве входных параметров для квазилинейной модели с новым коэффициентом вихревой вязкости использовались спектры поверхностных волн, доля покрытия пеной и средние размеры пузырьков, измеренные при определенных значениях скорости трения ветра. Значение коэффициента отношения высоты аэродинамической шероховатости к геометрической было получено равным 0,37 из условия наилучшего соответствия одной из серий экспериментов (для случая искусственной пены на поверхности воды для нейтральной стратификации воздушного потока). Тот же самый коэффициент использовался в расчетах в квазилинейной модели для других режимов эксперимента. Сравнение с экспериментами показало, что квазилинейная модель с новым коэффициентом вихревой вязкости хорошо воспроизводит аэродинамическое сопротивление поверхности воды. В этой модели коэффициент поверхностного сопротивления определяется формой сопротивления волн, вычисленной в квазилинейном приближении для измеренных спектров поверхностных волн и аэродинамической шероховатостью поверхности воды, частично покрытой пеной. Хорошее согласие модельных предсказаний и экспериментальных данных имеет место для коэффициента отношения шероховатости порядка единицы, что согласуется с ранее полученными результатами [Shtemler et al., 2010].

Также показано, что в случае чистой воды учет покрытия пеной из-за обрушения волн заметно улучшает предсказание коэффициента сопротивления при скорости ветра выше 25 м / с по сравнению с моделью гладкой поверхности. Сравнение результатов позволило

сделать вывод о том, что расчеты квазилинейной модели лучше согласуются с данными, собранными в случае покрытия искусственной пеной. По-видимому, это можно объяснить более низкой крутизной волнового поля, которая предполагает более слабые нелинейные эффекты, чем в случае чистой воды.



Рис.14. Зависимость коэффициента сопротивления от скорости трения воздушного потока для случаев искусственной пены на поверхности воды (а) и чистой воды (в); Символы - экспериментальные данные (символы с ободками использовались для определения коэффициента отношения аэродинамической и геометрической шероховатости); синяя сплошная линия - расчеты в квазилинейной модели с новым коэффициентом вихревой вязкости; пунктирная линия - расчеты в рамках квазилинейной модели с коэффициентом вихревой вязкости для гладкой поверхности по формуле Смолякова. Сравнение предсказаний теории с данными эксперимента для случаев искусственной пены на поверхности воды (б) и чистой воды (г)

Список литературы

Shtemler Y., Golbraikh E., Mond M. Wind–wave stabilization by a foam layer between the atmosphere and the ocean // Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2010. V.50(1). pp. 1-15.

2. Изучение влияния солености воды на процессы обмена в атмосфере

По результатам лабораторных экспериментов на ВВТСБ по исследованию влияния солености воды на процессы обмена импульсом, были получены зависимости коэффициента обмена импульсом от эквивалентной скорости ветра U10 для пресной воды и при использовании раствора бутанола 37мг/л, моделирующего условия соленой воды. Эти зависимости совпадают в пределах доверительных интервалов, что говорит об отсутствии влияния солености на обмен импульсом.





3. Моделирование и параметризация процессов переноса в пограничных слоях

Получены уравнения для расчета главных параметров, контролирующих динамику конвективного пограничного слоя атмосферы, а именно высоты конвективного слоя h, коэффициента вовлечения A с учетом его реальной изменчивости. Для создания оперативного метода расчета h и A потребовалось верифицировать уравнение вовлечения, определить эмпирические константы C4 и C5, рассмотреть общее уравнение глобального баланса плавучести.

Получены универсальные зависимости потокового числа Ричардсона (Ri_f) и скорости диссипации ТКЭ от *z/L* (Puc. 1,2). Для нестационарного режима введена релаксационная функция, параметризуемая на основе DNS/LES данных. В результате получено универсальное уравнение для ТКЭ, пригодное для описания атмосферного погранслоя в

широком диапазоне метеоусловий, в том числе при сильной устойчивой стратификации для *z/L* >> 1.

Проведено прямое численное моделирование неустойчиво-стратифицированного атмосферного пограничного слоя над взволнованной водной поверхностью. Изучено влияние когерентных вихревых структур, развивающихся в атмосферном погранслое при неустойчивой стратификации воздуха, на средние профили скорости и температуры воздушного потока (рис. 16). Проведено сравнение численных результатов с моделей параметризации турбулентных предсказаниями известных потоков в стратифицированном атмосферном погранслое над взволнованной водной поверхностью, использующихся в крупномасштабных климатических моделях (Zeng et al., 1998). Показано, что структуры вносят дополнительный вклад в перемешивание импульса и тепла и таким образом влияют на профили средних полей скорости и температуры, что обусловливает их отличие от предсказаний известных моделей прогноза атмосферного погранслоя (рис. 17).



Рис.16. Векторное поле скорости (U_y, U_z)(a), х-компонента скорости $\langle U_x \rangle$ (b), и температура $\langle T \rangle$, характеризующие структуру когерентных вихрей в плоскости (y,z) в неустойчиво-стратифицированном погранслое в DNS с балковыми числами Рейнольдса и Ричардсона Re = 15000 и Ri = 0.1. Крутизна поверхностной волны ka = 0.2, фазовая скорость с/U₀=0.05.



Рис.17. Средние профили скорости температуры в DNS с Re = 15000, Ri = 0.1, ka = 0.2, с/U₀=0.05 (красные линии) и предсказание модели (Zeng et al., 1998)(черные линии).

Список литературы

Zeng X., Zhao M., Dickinson R.E. Intercomparison of Bulk Aerodynamic Algorithms for the Computation of Sea Surface Fluxes Using TOGA COARE and TAO Data // Journal of Climate, 1998. V.11. pp. 2628-2644.

4. Исследование влияния формы шероховатостей поверхности на процессы обмена

Исследовано влияние формы шероховатостей водной поверхности на процессы турбулентного обмена в атмосферном погранслое. Проведено прямое численное моделирование (DNS) процессов обмена в присутствии паразитной капиллярной ряби на энергонесущих поверхностных волнах. Получены мгновенные и осредненные по ансамблю поля скорости и температуры воздушного потока для различных форм возвышения водной поверхности, параметров ряби и энергонесущих волн. Изучено влияние ряби на динамику когерентных структур в воздушном погранслое. Показано, что присутствие ряби приводит к ослаблению отрывов мгновенного поля скорости воздуха в окрестности гребней волн. Установлено, что осредненное поле скорости воздуха является безотрывным. Исследованы механизмы турбулентного переноса в буферном слое и в слое шероховатости. Проведено сравнение результатов DNS с предсказанием теоретической квазилинейной модели для профиля средней скорости и турбулентных потоков (Puc.18). Исследована зависимость параметра шероховатости от ширины критического слоя и от амплитуды энергонесущей волны (Puc. 19).



Рис. 18. Профили средней скорости (слева), турбулентного потока импульса (в середине), и турбулентной вязкости (справа) в DNS (символы) и согласно предсказанию квазилинейной модели (штриховая и сплошная кривые). Различные символы и кривые соответствуют различным типам ряби в DNS (Hung & Tsai, 2009).



Рис. 19 Зависимость параметра шероховатости от толщины критического слоя (а), амплитуды основной гармоники энергонесущей волны (б), и от комбинации (двойной регресии) этих параметров в DNS (символы) и согласно предсказанию квазилинейной модели (сплошная линия).

5. Изучение влияние термического режима водоема на процессы обмена в пограничных слоях воды и воздуха

Модифицированная и адаптированная под условия Горьковского водохранилища, программа Lake, была верифицирована с использованием данных натурных исследований 2014 г. и 2017 г. Лето 2014 г. (особенно в начале и середине) характеризуется значительно большей интенсивностью падающей солнечной радиации, более высокой температурой воздуха, и меньшими ветрами. Профили, полученные в период 2014 г, отличаются сильной стратификацией приповерхностного слоя, в отличие от периода 2017 года, когда наблюдались практически однородные по глубине профили из-за слабого прогрева и сильного перемешивания.

Для оценки численных результатов нами были последовательно проанализированы рассчитанные и измеренные значения температуры в контрольных точках (на разных горизонтах глубины), а также формы температурных профилей для характерных случаев и среднеквадратическое отклонение численных результатов от данных измерений.

В качестве контрольных уровней были выбраны: поверхность и глубины 1 м, 3 м, 8 м. Показано, что чем больше глубина, тем различия между расчетом и экспериментом

меньше, что лишний раз подтверждает большую изменчивость и сложность физических процессов в приповерхностном слое, обусловленных, в первую очередь, ветро-волновым взаимодействием.



Рис. 20. Сравнение измеренных и рассчитанных значений температуры на различных горизонтах глубины: (а) поверхность, (б) 1 м, (в) 3 м, (г) 8 м.

Расчеты достаточно хорошо описывают общие сезонные изменения температурного распределения по глубине. При переходе к сравнению форм профилей для характерных случаев в обоих сезонов, также видно, что расчеты хорошо не только качественно, но и количественно воспроизводят натурные данные. Однако наилучшего совпадения удалось достичь для режимов сильного перемешивания в 2017 г., по сравнению с сильной стратификацией в 2014 г. Причин этому может быть несколько:

1) Некорректные данные солнечной радиации, получаемые из реанализа: облачность над водоемом и сушей может сильно отличаться (ситуация аналогична со скоростью ветра, см. выше), проверить это сложно, т.к. отсутствуют сопутствующие данные натурных измерений.

2) При сильной эвтрофикации может локально изменяться коэффициент экстинкции, что сильно сказывается на поглощении излучения и нагрева приповерхностного слоя.

3) Необходимо учитывать зависимость коэффициента генерации турбулентности от характеристик ветро-волновой обстановки. Управляющими параметрами здесь могут быть амплитуда или уклон волн, а также скорость ветра. Например, на начальном этапе для условий крупных водоемов могут быть использованы параметризации, полученные для морских условий.



Рис. 21. Сравнение форм измеренных и рассчитанных температурных профилей: (а) стратифицированные профили 2014 г., (б) перемешанные профили 2017 г.

Для интегральной характеристики сопоставления натурных данных и прогнозов использовалось среднеквадратичное отклонение по температуре по всему ансамблю реализаций температурных профилей. Оно оказалось равным примерно 1°C в 2014 году, а для 2017 года - 0,4°C градуса, что подтверждает повышение точности расчетов по сравнению с использованием первоначальной версии, которая демонстрировала среднеквадратическое отклонение порядка 2-3 °C в обоих случаях.

Результаты, полученные при верификации Lake, позволят улучшить точность прогнозов с ее помощью и в дальнейшем объединить WAVEWATCH III, WRF и Lake в рамках прототипа модели микроклимата и локальной погоды природного ландшафта, содержащего внутренний водоем.

6. Применение модели волнения на внутреннем водоеме для случая прибрежной зоны

Было продемонстрировано, что полученная при аналогичных условиях коротких разгонов Горьковского водохранилища параметризация C_D (U₁₀) и соответственно адаптированная модель WAVEWATCH III будет обеспечивать лучшее соответствие расчетных данных и данных натурных измерений с буев, расположенных в прибрежной зоне Финского залива.



Рис.22. Распределение значительной высоты волнения в прибрежной зоне Финского залива (при использовании параметризации ST1 с новым предложенным коэффициентом аэродинамического сопротивления поверхности C_D).

Расчеты, проведенные в рамках оригинальной параметризации ST1 и параметризации ST1 с измененным C_D , верифицированы данными с буя Helsinki Suomenlinna (60.1233°, 24.9725°) (см. расположение на Рис.10). Использование новой параметризации C_D до 20% улучшает соответствие результатов моделирования реальным измерениям для высот значительных волн. Наибольший эффект наблюдается при сильных ветрах (см. рис. 23). Это ожидаемый результат, так как в численном эксперименте с заданием предложенной параметризации C_D инкремент накачки задается более точно, то есть более точно моделируется количество энергии, поступающей в систему.



Рис.23. Сравнение данных расчета (красным цветом обозначены данные при подключении стандартной параметризации ST1, зеленым - при подключении параметризации ST1 с новым предложенным коэффициентом аэродинамического сопротивления поверхности C_D) и данных измерений буя Suomenlinna. (а) Значительные высоты волнения, (б) средневзвешенные периоды волнения.

5. Описание выполненных в отчетном году работ и полученных научных результатов для публикации на сайте РНФ

на русском языке

Выполнена серия лабораторных экспериментов на ВВТСБ ИПФ РАН, по 1. исследованиям пены процессы теплообмена при влияния на ветро-волновом взаимодействии. Параметры воздушного потока были получены из измерений профилей скоростей и температуры. Спектры по частотам и волновым числам поверхностных волн были получены из измерений высоты поверхности воды трехканальной антенной датчиков возвышения поверхности воды. Параметры пены на поверхности воды контролировалось видеосъемкой поверхности воды. Были определены доли покрытия и распределения по размерам пузырьков.

Результаты измерений сравнивались предсказаниями квазилинейной с модели пограничного слоя атмосферы над поверхностью волнистой воды. В ней использовалась турбулентной вязкости, которой коэффициент новая модель в отношения аэродинамической и геометрической шероховатости был определен по результатам эксперимента. В случае поверхности воды, покрытой пеной, было достигнуто хорошее согласие между предсказаниями модели с параметром шероховатости, определяемым размерами пузырьков пены и экспериментальными данными. Это подтверждает безотрывный характер воздушного потока вокруг волн в случае повышенной шероховатости поверхности.

2. Разработана методика моделирования свойств соленой морской воды на основе применения следовых концентраций растворов бутанола. Выполнена серия лабораторных экспериментов на ВВТСБ ИПФ РАН, по исследованиям влияния солености на процессы теплообмена при ветро-волновом взаимодействии. Параметры воздушного потока были получены из измерений профилей скоростей и температуры. Спектры частотно-волновых чисел поверхностных волн были получены из измерений высоты поверхности воды трехканальной антенной датчиков возвышения поверхности воды. Были получены зависимости коэффициента обмена импульсом от эквивалентной скорости ветра U10 для пресной воды и при использовании раствора бутанола 37мг/л, моделирующего условия соленой воды 35 промиле. Эти зависимости совпадают в пределах доверительных интервалов, что говорит об отсутствии влияния солености на обмен импульсом. Также не обнаружено изменения параметров волнения.

3. Получены расчета параметров, контролирующих уравнения для динамику конвективного пограничного слоя атмосферы (высоты конвективного слоя, коэффициента вовлечения) с учетом его реальной изменчивости на основе верифицированого уравнения вовлечения и общего уравнения глобального баланса плавучести. Проведено прямое численное неустойчиво-стратифицированного атмосферного моделирование пограничного слоя над взволнованной водной поверхностью. Изучено влияние когерентных вихревых структур, развивающихся в атмосферном погранслое при неустойчивой стратификации воздуха на средние профили скорости и температуры воздушного потока. Проведено сравнение численных результатов с предсказаниями известных параметризаций турбулентных потоков в стратифицированном атмосферном погранслое над взволнованной водной поверхностью, использующихся в крупномасштабных климатических моделях. Показано, что структуры вносят дополнительный вклад в перемешивание импульса и тепла и таким образом влияют на профили средних полей скорости и температуры, что обусловливает их отличие от предсказаний известных моделей прогноза атмосферного погранслоя. На основе обобщения данных DNS и LES проведена параметризация уравнения для турбулентной кинетической энергии в атмосферном пограничном слое над водной поверхностью. Получены универсальные зависимости потокового числа Ричардсона и скорости диссипации ТКЭ. Для нестационарного режима введена релаксационная функция, параметризуемая на основе DNS/LES данных. Получено универсальное уравнение для ТКЭ, для описания атмосферного погранслоя в широком диапазоне метеоусловий, в том числе при сильной устойчивой стратификации.

4. Исследовано влияние формы шероховатостей водной поверхности на процессы турбулентного обмена в атмосферном погранслое. Проведено прямое численное моделирование (DNS) процессов обмена в присутствии паразитной капиллярной ряби на энергонесущих поверхностных волнах. Изучено влияние ряби на динамику когерентных структур в воздушном погранслое. Показано, что присутствие ряби приводит к ослаблению мгновенных отрывов течения в окрестности гребней волн. Установлено, что осредненное поле скорости воздуха является безотрывным. Проведено сравнение результатов DNS с предсказанием теоретической квазилинейной модели для профиля

средней скорости и турбулентных потоков. Исследована зависимость параметра шероховатости от ширины критического слоя и от амплитуды энергонесущей волны.

5. В рамках работ по проекту предложена модификация программного комплекса LAKE для прогнозирования временной эволюции распределения температуры по глубине во внутренних водоемах. Модификация затронула процедуру задания входных данных и обеспечила корректный учет ветрового воздействия на процессы перемешивания во внутренних водоемах. В качестве данных текущей метеорологической обстановки для расчетов использовались данные глобального метеорологического реанализа NCEP/NCAR. Результаты расчетов были сопоставлены с температурными профилями, измеренными в озерной части Горьковского водохранилища с помощью свободно падающего СТД-зонда. Продемонстрировано, что результаты расчетов хорошо согласуются с реальными сезонными изменениями термического режима, происходящими в Горьковском водохранилище.

6. Проверено предположение об эффективности применения адаптированной к условиям малых разгонов внутренних водоемов модели WAVEWATCH III в условиях малых разгонов прибрежных зон. Для проверки данного предположения были произведены расчеты в прибрежной зоне Финского залива около г. Хельсинки. Верификация расчетов проводилась на основе данных натурных измерений с буев, расположенных в прибрежной зоне Финского залива. Использование новой параметризации C_D до 20% улучшает соответствие результатов моделирования реальным измерениям для высот значительных волн.

на английском языке

1. A series of laboratory experiments were carried out on TSWiWaT IAP RAS on the study of the effect of foam on heat transfer processes during wind-wave interaction. Airflow parameters were obtained from measurements of velocity and temperature profiles. Spectra of the frequency-wave numbers of surface waves were obtained from measurements of the height of the water surface by a three-channel antenna of the wave gauges. The parameters of the foam on the surface of the water was controlled by video recording the surface of the water. Foam coverage fraction and bubble size distributions were determined.

The measurement results were compared with the predictions of a quasilinear model of the atmospheric boundary layer above the surface of undulating water. It used a new model of turbulent viscosity, in which the ratio of the aerodynamic and geometric roughness was determined from the results of the experiment. In the case of the wavy surface covered with foam, a good agreement was reached between the predictions of the model with the roughness parameter determined by the size of the foam bubbles and the experimental data. This confirms the nonseparated behavior of the air flow around the waves in case of increased surface roughness.

2. A technique for modeling the properties of salty seawater based on the use of trace concentrations of butanol solutions was developed. A series of laboratory experiments at the TSWiWaT IAP RAS, on the study of the effect of salinity on heat transfer processes during wind-wave interaction, were carried out. Airflow parameters were obtained from measurements of velocity and temperature profiles. Spectra of the frequency-wave numbers of surface waves were obtained from measurements of the height of the water surface by a three-channel antenna of the sensors of the elevation of the water surface. The dependences of the drag coefficient on the equivalent wind speed U10 for fresh water and using 37 mg/l butanol solution, simulating salt water conditions of 35 ppm, were obtained. These dependences coincide within the confidence intervals, which indicates the absence of the effect of salinity on the pulse exchange. Also not detected changes in the parameters of wavy regimes

3. Equations for calculating the parameters controlling the dynamics of the convective atmospheric boundary layer (height of the convective layer, entrainment coefficient) are obtained, taking into account its real variability based on the verified entrainment equation and the general equation of the global buoyancy balance. Direct numerical simulation of unstably-stratified atmospheric boundary layer over waved water surface has been performed. The influence of coherent vortex structures developing in the boundary layer on the mean profiles of air flow velocity and temperature has been investigated. Numerical results have been compared against predictions of known parameterizations for turbulent fluxes in stratified atmospheric boundary layer above waved water surface used in large-scale climate models. The results show that the structures contribute to the mixing of momentum and heat and so modify the profiles of mean velocity and temperature and thus cause deviations from predictions of known prognostic models of atmospheric boundary layer. Based on the generalization DNS and LES data, the equation for turbulent kinetic energy in the atmospheric boundary layer above the water surface was parameterized. The universal dependences of the flow Richardson number and the rate of dissipation of TKE are obtained. For the non-stationary mode, a relaxation function is introduced, parameterized on the basis of DNS / LES data. A universal equation is obtained for the TKE, for describing the atmospheric boundary layer in a wide range of meteorological conditions, including a strong stable stratification.

4. The influence of water-surface roughness on the processes of turbulent exchange in the atmospheric boundary layer has been investigated. Direct numerical simulation of the exchange processes in the presence of parasitic capillary ripples riding on the energy-containing surface waves has been performed. The influence of the ripples on the dynamics of coherent structures in the boundary-layer air-flow. The results show that in the presence of ripples, the instantaneous flow separations in the vicinity of the wave crests are weakened. However there are no meanflow separations. The DNS results have been compared against the predictions of a quasi-linear theoretical model for mean velocity and turbulent stress profiles. The dependence of surface roughness parameter on the width of the critical layer and the amplitude of the carrier wave has been investigated.

5. The modification of the LAKE program package intended for predicting the time evolution of the vertical temperature distribution in inland water objects. The modification affected the procedure of input data assignment and provided a correct account of the wind impact on the processes of mixing in inland waters. NCEP/NCAR global meteorological reanalysis data were used for calculations as data of the current meteorological situation. The temperature profiles measured in the lake part of the Gorky reservoir using a freely falling CTD-probe were used for comparison with numerical results. It is demonstrated that the results of the calculations are in good agreement with the real seasonal changes in the thermal regime in the Gorky reservoir.

6. The assumption about the effectiveness of the use of the WAVEWATCH III model adapted to the conditions of small fetches of inland waters under conditions of small fetches of coastal zones has been verified. To verify this assumption, calculations were made in the coastal zone of the Gulf of Finland near the city of Helsinki. Verification of the calculations was carried out on the basis of field measurements from buoys located in the coastal zone of the Gulf of Finland. The use of new parameterization up to 20% improves the fit of the simulation results with real measurements for the significant wave heights.