

На правах рукописи

Кузнецова Александра Михайловна

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПОВЕРХНОСТНОГО ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ
НА КОРОТКИХ РАЗГОНАХ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

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

Нижний Новгород – 2019

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

Научный руководитель

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

Официальные оппоненты

Гулев Сергей Константинович, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт океанологии имени П. П. Ширшова Российской академии наук» (ИО РАН);

Кудрявцев Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ)

Ведущая организация


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии наук (ИФА РАН)

Защита диссертации состоится «21» октября 2019 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 002.069.01 в ИПФ РАН по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН и на официальном сайте ИПФ РАН <http://www.ipfran.ru/training/img/2019/Kuznetcova.pdf>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



А.И. Малеханов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Определение параметров приводного ветра и поверхностного волнения в условиях крупных и средних внутренних водоемов (например, равнинных водохранилищ на реках Волжского каскада или реках Сибири) представляет собой важную практическую задачу. В частности, волнение и ветровой режим являются важнейшими факторами, определяющими эрозию берегов, их учет необходим при обеспечении безопасности судоходства, особенно маломерных судов. Регулярный общедоступный прогноз ветра и волнения организован на сайте NOAA для Великих озер [1]. Параметры ветровых волн в значительной мере определяют состояние поверхности водоема и оказывают влияние на термогидродинамический режим водохранилища, а также турбулентные потоки в приводном слое атмосферы, внося, таким образом, вклад в особенности микроклимата территорий, прилегающих к водоему.

В 70 – 80-е годы изучению ветроволнового режима на акватории водохранилищ и озер уделялось значительное внимание. Так, например, в Институте биологии внутренних вод РАН был разработан «комплекс программ для моделирования гидродинамических процессов в водохранилищах, расчета воздействия динамики вод на распределение живых организмов, а также моделирования распространения взвешенных веществ и сточных вод» [2]. Однако моделирование волнения при этом проводилось по простым расчетным формулам. Известно, что расчетные формулы хорошо воспроизводят среднеклиматические значения параметров, но плохо описывают экстремальные параметры. Современные численные модели [3], [4] дают при этом значительно лучшие результаты. Однако программы для моделирования волнения развиваются в основном применительно к открытым морям и океанам. В последнее время развивается практика оперативного прогноза волн на больших озерах с применением моделей WAVEWATCH III [3] и WAM [5], [6], [7]. Глобальные модели прогноза волнения, основанные на спектральном представлении волнового поля (WAVEWATCH III, SWAN [8], WAM [9]), а также модели циркуляции атмосферы (WRF [4], ECMWF [10]) обобщают все основные экспериментальные и теоретические достижения, полученные за прошедшие двести лет существования теории поверхностных волн [11] и исследования атмосферы [12] соответственно.

Однако при моделировании ветра и волнения на акватории внутренних водоемов малых и средних размеров (с характерными линейными размерами не более 100 км), при малых разгонах волн остается ряд проблем. Пространственное разрешение расчетных характеристик поверхностного волнения и параметров атмосферы, применяемое для глобальных прогнозов, варьируется в диапазоне $0.205^\circ - 2,5^\circ$, что является недостаточно точным для внутренних водоемов. Попытки непосредственного использования глобальных моделей для локального прогноза на более мелкой сетке без специальной адаптации

обычно приводят к результатам, сильно отличающимся от данных измерений, так как условия внутреннего водоема обладают рядом особенностей, прежде всего, малыми ветровыми разгонами, т.е. более низкими по сравнению с условиями открытого океана значениями параметра возраста волнения [13]. К особенностям волн на малых разгонах водохранилищ средних размеров относится также более интенсивная ветровая накачка: ветровой инкремент поверхностных волн пропорционален отношению динамической скорости ветра (или скорости ветра на высоте 10 м) к фазовой скорости волны [3]. Еще одной особенностью является большая крутизна поверхностных волн по сравнению с условиями открытого океана, для которой можно ожидать большей интенсивности их нелинейного взаимодействия. К другим особенностям можно отнести близость берега и сложную структуру приповерхностного слоя атмосферы, наличие границы перехода суша – вода. Близость береговой линии влияет на структуру воздушного потока. Пограничный слой формируется над твердой поверхностью берега, а потом «адаптируется» к условиям взволнованной водной поверхности, причем эта перестройка происходит снизу вверх. В силу малых размеров, то есть непродолжительного взаимодействия ветра с водой, это не влияет на крупномасштабные процессы, а потому никак не отражается в глобальных моделях, но становится существенным при моделировании непосредственно водоема

В работе предлагается способ расчета волнения под действием неоднородного ветра при помощи ветровой накачки из атмосферной модели WRF (Weather Research & Forecasting) [4]. Задание поля ветра из WRF с высоким пространственным разрешением обеспечивает возможность прогноза волн с высоким разрешением, что является востребованным решением как для внутренних водоемов, так и для прибрежных зон.

Таким образом, задача исследования особенностей развития поверхностного волнения на коротких разгонах, типичных для условий внутренних водоемов, на основе адаптации имеющихся глобальных моделей прогноза волнения, например, WAVEWATCH III (WW3) [3], ориентированных, прежде всего, на океанские условия, к условиям внутренних водоемов, является важной и актуальной.

Цель работы

Целью данной диссертационной работы является исследование особенностей развития поверхностного волнения на коротких разгонах, типичных для условий внутренних водоемов, на основе объединения спектральной численной модели WAVEWATCH III и мезомасштабной модели атмосферной циркуляции WRF.

В ходе выполнения работы были решены следующие задачи:

1. Изучена чувствительность результатов моделирования параметров волн на коротких разгонах к использованию модели ветрового инкремента в том числе при использовании новой предложенной параметризации аэроди-

намического сопротивления C_D , и проведена верификация на основе натуральных измерений.

2. Изучена чувствительность результатов моделирования параметров волн на коротких разгонах к использованию параметризаций четырехволновых нелинейных взаимодействий, в том числе параметризации Discrete Interaction Approximation (DIA) с новыми предложенными оптимизированными для коротких разгонов параметрами, и проведена верификация на основе натуральных измерений.

3. Проведено исследование чувствительности результатов моделирования поля ветра над водоемом средних размеров в рамках мезомасштабной модели атмосферной циркуляции WRF к подходам к моделированию (уравнения Рейнольдса, вихреразрешающее моделирование) и их верификация на основе натуральных измерений.

4. Разработана объединенная модель WRF – WAVEWATCH III для прогноза волнения на внутреннем водоеме средних размеров (на примере Горьковского водохранилища) и проведена ее верификация на основе натуральных измерений.

5. Оценена применимость разработанной модели для прогноза волнения на других акваториях со сходными параметрами на примере прибрежной зоны Финского залива, Персидского залива и экстремальных условий тропического циклона.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы подтверждается следующими полученными оригинальными результатами:

1. Предложена параметризация аэродинамического сопротивления взволнованной поверхности и четырехволновых нелинейных взаимодействий для адаптации волновой модели WAVEWATCH III к условиям коротких разгонов. На основе натуральных измерений на полигоне Горьковского водохранилища показано, что в условиях коротких разгонов использование предложенной адаптированной модели WAVEWATCH III повышает точность вычисления количества энергии, поступившей в систему, и ее перераспределение по спектру по сравнению с применением стандартных параметризаций. Показан существенный вклад ветровой накачки в эволюцию ветрового волнения на коротких разгонах волн.

2. На примерах расчета развития волнения на коротких разгонах в прибрежной зоне океана показано, что применение адаптации модели WAVEWATCH III повышает точность прогноза интегральных параметров волнения по сравнению со стандартными параметризациями.

3. Для описания атмосферной циркуляции над внутренним водоемом средних размеров применены два подхода к решению уравнений гидротермодинамики атмосферы в рамках мезомасштабной модели WRF. На примере Горьковского водохранилища показано, что повышение пространственного

разрешения модели значительно улучшает прогноз приводного ветра по сравнению с данными реанализа. При этом подход, связанный с применением метода крупных вихрей в планетарном пограничном слое повышает точность прогноза скорости ветра по сравнению с подходом, основанном на решении уравнений Рейнольдса.

4. Для внутреннего водоема впервые предложена комбинированная система анализа ветра и волнения, полученная при объединении волновой и атмосферной моделей. На примере данных натуральных измерений показано, что для внутреннего водоема использование данной системы для прогноза волн на коротких разгонах повышает точность моделирования средних параметров волнения в сравнении с применением данных реанализа о скорости ветра.

Основные положения, выносимые на защиту

1. На коротких разгонах волновая модель WAVEWATCH III высокочувствительна к использованию модели ветрового инкремента и четырехволновых нелинейных взаимодействий. В отличие от условий развитого волнения, где определяющим механизмом является нелинейное четырехволновое взаимодействие, в условиях коротких разгонов в эволюцию ветрового волнения существенный вклад вносит ветровая накачка.

2. Для внутренних водоемов средних размеров наилучшее согласие результатов моделирования и данных измерений ветрового волнения достигается при использовании ветровой накачки, полученной в рамках модели WRF методом крупных вихрей.

3. Адаптированная к условиям коротких разгонов модель WAVEWATCH III позволяет прогнозировать параметры волнения на акваториях со сходными параметрами, в том числе в прибрежной зоне.

Достоверность научных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием экспериментальных данных и данных численных расчетов. Проведенные исследования опираются на ранее опубликованные работы, приведенные в списке цитируемой литературы. Основные положения диссертации опубликованы в ведущих российских и зарубежных журналах, многократно докладывались на конференциях и обсуждались на семинарах ИПФРАН и выездных семинарах.

Апробация результатов работы и публикации

Результаты диссертации были использованы в ходе исследовательских работ в рамках грантов РФФИ (инициативные и региональные), грантов РНФ (19-17-00209, 14-17-00667, 15-17-20009), грантов Президента РФ молодым кандидатам наук (МК-5575.2012.5, МК-2041.2017.5).

Основные результаты и положения работы доложены:

- на семинарах ИПФ РАН,
- на выездных семинарах в Национальном центре исследования атмосферы (NCAR, Боулдер, США) и в Финском метеорологическом институте (FMI, Хельсинки, Финляндия),
- в статьях в реферируемых журналах, входящих в систему международных систем цитирования (Web of Science и Scopus) и в РИНЦ,
- на международных конференциях: EGU General Assembly, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 и 2019 гг.; WISE meeting (Waves in Shallow water Environment), 2015, 2017 и 2018 гг.; International scientific school of young scientists Wave and Vortices in Complex Media, 2014 г.; Geosciences Student Conference, 2014 г.; Topical problems of nonlinear wave physics, 2014 г.; Computer simulations in physics and beyond, 2017, 2018 гг.;
- на российских конференциях: Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 2015 г.; Нижегородская сессия молодых ученых 2014, 2015, 2017 гг.; Форум "Великие реки", 2015 г.; Гидрометеорология и экология, 2017 г.; XVIII Научная школа "Нелинейные волны – 2018", 2018 г.; КИМО (Комплексные исследования Мирового океана), 2016, 2017, 2018, 2019 гг.

Результаты диссертации изложены в 37 работах автора, из которых 9 – статьи, опубликованные в реферируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 28 – статьи в сборниках трудов и тезисы докладов на российских и международных конференциях.

Личный вклад автора

Все приведенные в диссертации результаты получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Результаты численного моделирования поверхностного волнения на акватории Финского залива получены в сотрудничестве с О. Ваха-Пииккио, Финский метеорологический институт. Данные натурных измерений, используемые для сравнения с расчетными данными, получены Г.А. Байдаковым.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка работ автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 110 страниц, включая 48 рисунков и 2 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 124 источника.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

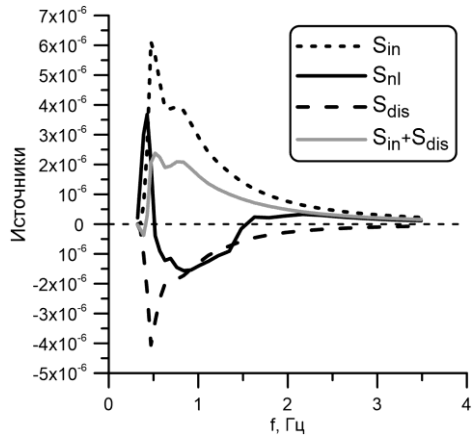
Во Введении обосновывается актуальность работы, формулируются её цели, кратко излагается содержание диссертации.

В Главе 1 приведен обзор некоторых значительных исследований, сформировавших современные представления о численном моделировании поверхностного волнения, приведены современные модели ветрового волнения, обсуждаются вопросы валидации этих моделей. В разделе 1.1. приводится введение к Главе 1. В разделе 1.2. описан исторический обзор методов моделирования волнения от ранних прогнозов волнения, которые создавались вручную на основе эмпирических соотношений между текущим состоянием моря и основными волнообразующими факторами, до численного моделирования при помощи решения уравнения баланса плотности волнового действия с учетом ветроволнового взаимодействия, основанного на работах Филлипса [14], Майлза [15], и нелинейных четырехволновых взаимодействий, основанных на работах Хассельмана [16]. В разделе 1.3. приведен общий принцип работы моделей третьего поколения, состоящий в подготовке начальных данных, расчете модели и обработке выходных данных. Выходные данные расчета моделей ветровых волн представляют собой набор волновых спектров с амплитудами, связанными с каждой частотой и направлением распространения. Результирующие спектры в основном суммируются и представляются в виде значительной высоты волны и среднего периода волнения. Приведен обзор современных моделей, используемых для создания волновых прогнозов: WAM, SWAN, WAVEWATCH III, AARI-PD2, PABM. В разделе 1.4. описаны методы валидации моделей. В разделе 1.5. подробно описана модель WAVEWATCH III (далее WW3), на основе и с использованием которой проводятся исследования, приведенные в Главах 2, 3 и 4. Точность результатов волновых моделей сильно зависит от используемой для форсинга модели ветра. Требования к метеорологическим моделям повышаются для закрытых прибрежных вод или замкнутых бассейнов, где поля ветра сильно зависят от локальных условий, которые не описываются глобальными метеорологическими моделями. В разделе 1.6. приведены способы задания «форсинга» ветром, то есть распределения скорости и направления ветра, под действием которого развивается волнение. В разделе 1.7. указан способ обмена данными между волновыми и атмосферными моделями, “2 – way coupling”, который позволяет учитывать двустороннее воздействие системы «атмосфера – вода». В разделе 1.8. описаны проблемы создания прогнозов волнения на коротких разгонах, послужившие предпосылкой для написания данной диссертационной работы. В разделе 1.9. описаны постановка и результаты натурных экспериментов, используемых для верификации расчетов, проводимых в диссертационной работе. Среднее наблюдаемое в эксперименте значение параметра возраста волнения $\Omega = U_{10}/c_p$ составляет 2, дисперсия 0,7. Разгон волн составляет 6 – 8 км, что при наблюдаемых ветрах соответствует безразмерному разгону $X = Lg/U_{10}^2$ в интервале 500 – 12000, здесь L – разгон волн в метрах, g –

гравитационная постоянная, U_{10} – скорость ветра на стандартной метеорологической высоте 10 м. Данные значения соответствуют коротким разгонам. Раздел 1.10 содержит заключение к Главе 1.

В Главе 2 описаны предложенные способы учета особенностей моделирования волн на коротких разгонах. Раздел 2.1 содержит введение к вопросам, обсуждаемым в Главе 2. При малых разгонах параметры возбуждения и развития волн сильно отличаются от аналогичных параметров, характерных для больших разгонов открытого океана. К особенностям волн на малых разгонах водохранилищ средних размеров относится более интенсивная ветровая накачка, пропорциональная отношению динамической скорости ветра (или скорости ветра на высоте 10 м) к фазовой скорости волны. Еще одной особенностью является более сильная нелинейность, вызванная большой крутизной волн. Таким образом, подстройка океанской волновой модели к условиям внутренних водоемов средних размеров осуществляется в два этапа: подстройка ветровой накачки и "интеграла столкновений". Диссипация из-за опрокидывания волн носит универсальный характер. В разделе 2.2 обсуждается важность корректного учета ветроволнового взаимодействия на коротких разгонах. В условиях развитого волнения показано, например, в работах Захарова [17], что механизмом, определяющим развитие ветрового волнения, является нелинейное волновое взаимодействие. В условиях коротких разгонов Горьковского водохранилища мы показали, что основной вклад в развитие волнения вносит именно ветровая накачка. На Рис. 1 показан вклад в итоговый спектр от функции источников и стоков энергии в приближении глубокой воды (ветровая накачка S_{in} , четырехволновые нелинейные взаимодействия S_{nl} , диссипация S_{dis}).

Рис. 1. Вклад от ветровой накачки S_{in} , четырехволновых нелинейных взаимодействий S_{nl} , диссипации S_{dis} в итоговый спектр.



Видно, что интегральный вклад ветровой накачки и диссипации примерно равен вкладу от нелинейных взаимодействий, и даже превышает в районе энергонесущего пика.

В общем случае ветровая накачка S_{in} задается в соответствии с моделью Майлса нарастания волн под действием ветра [15]:

$$S_{in} = \beta N \sigma, \quad (1)$$

где β – безразмерный коэффициент, через который выражается скорость роста волн за счет ветровой накачки («wind wave growth rate» в [15]):

$$\text{Im} \sigma = \frac{1}{2} \sigma \frac{u_*^2}{c^2} \beta, \quad (2)$$

где c – фазовая скорость волны. В рассмотренных параметризациях ветровая накачка определяется параметром β и зависимостью $u_*(U_{10})$, определяемой коэффициентом C_D . Для уточнения счета модели WW3 на внутренних водоемах средних размеров использована полученная в результате натурных измерений параметризации коэффициента аэродинамического сопротивления $C_D(U_{10})$.

В разделе 2.3. указана адаптация и конфигурация модели WW3 для использования в нетипичных для нее условиях коротких разгонов внутренних водоемов. Для описания водоема использовалась топографическая сетка Горьковского водохранилища размерностью 72×108 с шагом $0,00833^\circ$, которая была взята из данных NOAA “Global Land One-kilometer Base Elevation (GLOBE)”. Также в открытом программном коде было изменено значение минимальной значительной высоты волнения (H_S). Диапазон частот был изменен в соответствии с наблюдаемым в эксперименте диапазоном от $0,2$ Гц до ≈ 4 Гц.

Раздел 2.4. посвящен подстройке параметризации функции ветровой накачки. Был произведен расчет ветрового волнения для встроенных параметризаций WAM 3, Tolman & Chalikov и WAM 4. В адаптированной модели WW3 было использовано уточненное задание ветровой накачки, состоявшее в использовании предложенной экспериментальной параметризации C_D в рамках параметризаций WAM 3 и Tolman & Chalikov. Для всех проведенных экспериментов было проведено сравнение интегральных характеристик – H_S и среднего периода T_m . На Рис. 2 по оси абсцисс отложены значения, полученные в натурном эксперименте, по оси ординат – результаты численного моделирования. На верхних графиках для всех рассмотренных параметризаций (встроенных и с заданием новой параметризации C_D) сопоставлены значения H_S в эксперименте и в результате численного моделирования, на нижних – значения T_m . Для всех встроенных моделей наблюдается систематическое завышение высоты волнения и занижение среднего периода волнения, при этом было вычислено среднеквадратичное отклонение расчетных данных от экспериментальных по формуле:

$$\text{std} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(M_i - O_i)^2}{O_i^2}} \quad (3)$$

Среднеквадратичное отклонение расчетных H_S для WAM 3 составляет 52%, для Tolman & Chalikov – 40%, для WAM4 – 46%. Использование новой параметризации C_D уменьшает среднеквадратичное отклонение H_S для WAM 3 с 52% до 39%, для Tolman & Chalikov с 40% до 37%. 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.

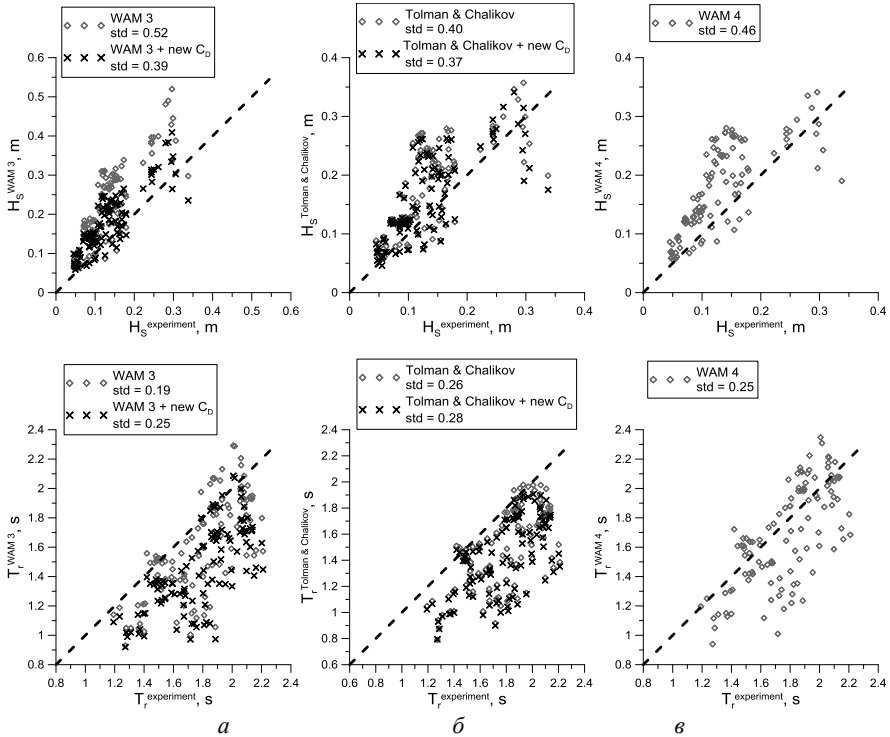


Рис. 2. H_S (верхние графики) и T_m (нижние графики) в сравнении с данными натурального эксперимента для а) параметризации WAM 3 (ромбики) и WAM 3 с новым C_D (крестики), б) параметризации Tolman & Chalikov (ромбики) и Tolman & Chalikov с новым C_D (крестики), в) параметризации WAM4 (ромбики).

Однако также из нижних графиков на Рис. 2 видно, что предсказание средних периодов волнения имеет значительную погрешность, и уточнение задания инкремента накачки не внесло существенных изменений. В [разделе 2.5](#) обсуждаются причины и методы преодоления данного несоответствия. Главным образом, это связано с тем, что в модели WW3 рассматриваются волны, характерные для морских и океанских условий, которые имеют меньшую крутизну по сравнению с волнами на внутреннем водоеме средних раз-

меров. Коэффициенты пропорциональности в модели четырехволновых нелинейных взаимодействий DIA [18, 19] подстроены именно под морские условия. Более крутым волнам внутреннего водоема средних размеров могут требоваться другие параметры подстройки, соответствующие ситуации с большей нелинейностью, что должно приводить к более быстрой передаче энергии в низкочастотную область (downshift). Соответственно и средние периоды волн должны быть большими. Численное моделирование поверхностного волнения в условиях Горьковского водохранилища, проведенное с использованием встроенных в модель WW3 параметризаций нелинейности, показало неэффективность воспроизведения периодов волнения как приближенными параметризованными методами расчета (SNL1, SNL3), так и прямыми численными методами расчета интеграла Больцмана (SNL2, SNL4) в сравнении с экспериментальными данными. Для возможности использования модели WW3 в условиях коротких разгонов внутренних водоемов средних размеров была произведена подстройка параметров схемы нелинейности на основе широко используемой параметризации DIA.

Была составлена программа, минимизирующая отклонения предсказания модели от данных натурных измерений. В результате было получено распределение среднеквадратичного отклонения расчета модели DIA от экспериментальных данных при разных параметрах, входящих в параметризацию DIA (Рис. 3). Пунктирным контуром выделена область со значениями среднеквадратичного отклонения, не превышающими 20% по периодам. При этом среднеквадратичное отклонение при использовании "дефолтных" параметров составляет 33% по значительным высотам волн и 28% по периодам.

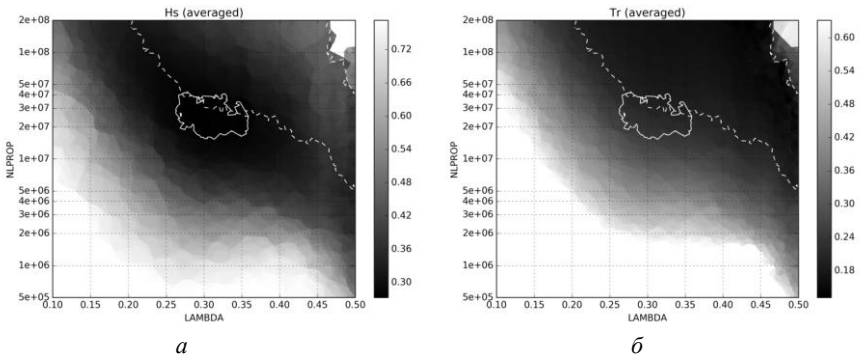


Рис. 3. Распределение среднеквадратичного отклонения расчета модели DIA от экспериментальных данных при подключении параметризации WAM 3 с измененным C_D для а) H_s , б) T_r .

В пересечении этих областей были выбраны "оптимальные" параметры для использованных параметризаций ветровой накачки, адаптированных к условиям внутреннего водоема. Для модели WAM 3 параметры (λ_{nl}, C) составили $(0.29, 3.8 \cdot 10^7)$ вместо $(0.25, 2.78 \cdot 10^7)$.

Для DIA с предложенными "оптимальными" параметрами наблюдалось улучшения воспроизведения периодов моделью WW3 по сравнению с оригинальной DIA (Рис. 4).

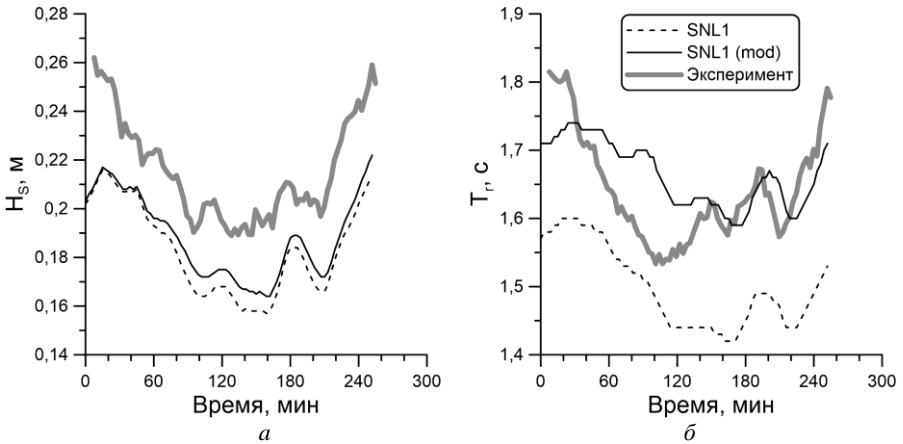


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные данные для оригинальной версии DIA (SNL1) и для DIA с предложенными "оптимальными" параметрами (SNL1 (mod)) для тестового дня 14.07.2017: (а) значительные высоты волн и (б) средние периоды волн при измененной ветровой накачке WAM 3.

В [разделе 2.6](#) показано, что при изменении параметризации нелинейности незначительно меняется форма углового распределения, сохраняя при этом распределение для основных гармоник. Было также отмечено, что изменение параметра ветровой накачки полностью сохраняет форму углового спектра. В [разделе 2.7](#) сделано заключение к Главе 2.

Нужно отметить, что для подтверждения универсальности предложенной в Главе 2 адаптации модели WAVEWATCH III требуется провести расчеты в условиях коротких разгонов других водоемов. Однако можно ожидать, что поведение модифицированной WAVEWATCH III будет лучше соответствовать реальному волнению, чем WAVEWATCH III с встроенными параметризациями, ориентированными на морские или океанские условия, что наблюдалось для условий исследуемого Горьковского водохранилища. В [Главе 3](#) оценена применимость разработанной модели для прогноза волнения на других акваториях со сходными параметрами на примере прибрежной зоны Финского залива, Персидского залива и в экстремальных условиях тропического циклона в Атлантическом океане. [Раздел 3.1](#) содержит введение к Главе 3.

В [разделе 3.2](#) предложенная адаптация модели WW3 была применена для расчета параметров волнения в Балтийском море в прибрежной зоне Финского залива. Было продемонстрировано, что полученная при аналогичных условиях коротких разгонов (диапазон значений безразмерного разгона был бли-

зок к условиям текущего эксперимента и составлял 900 – 7000) Горьковского водохранилища параметризация аэродинамического сопротивления $C_D(U_{10})$ и адаптированная модель WW3 будут обеспечивать лучшее соответствие расчетных данных и данных натуральных измерений с буюв, расположенных в прибрежной зоне Финского залива (Рис. 5).

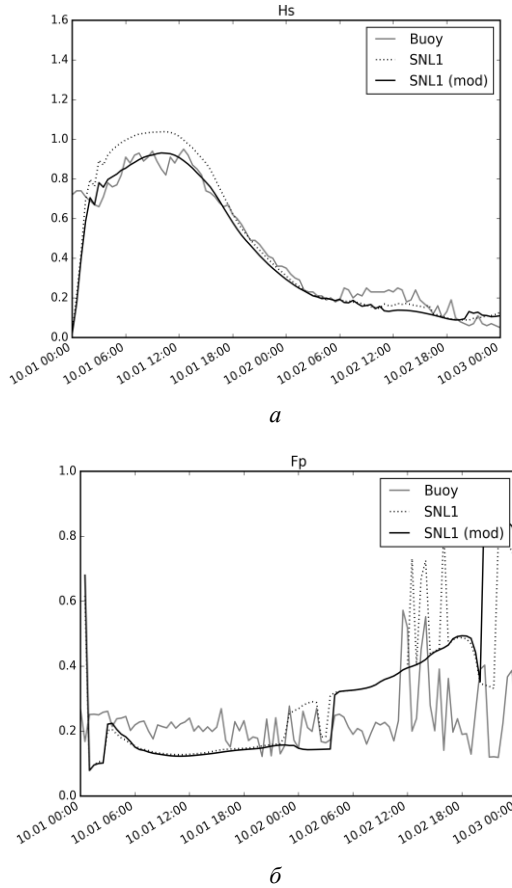


Рис. 5. Сравнение данных расчета (пунктирной линией обозначены данные при подключении стандартной параметризации WAM 3, сплошной черной линией – при подключении параметризации WAM 3 с новым предложенным коэффициентом аэродинамического сопротивления поверхности C_D) и данных измерений бую Суоменлина (серым цветом). (а) Значительные высоты волнения, (б) средние периоды волнения.

В разделе 3.3. модель WW3 была применена также на акватории Персидского залива, предложенная параметризация ветроволнового взаимодействия

в модели WW3 сравнивается с современными широко используемыми в оперативной метеорологии параметризациями.

Раздел 3.4. посвящен апробации модели WW3 в экстремальных условиях атлантического циклона. Подраздел 3.4.1. содержит введение. Подраздел 3.4.2. описывает используемую конфигурацию модели WW3, рассчитанные параметры волнения при его развитии под действием ураганного ветра и сравнение с данными буев. Рассчитанные моделью экстремальные значения в условиях высоких скоростей ветра имеют близкие результаты и незначительные отклонения от данных, измеренных буем (Рис. 6).

В подразделе 3.4.3. на основе полученных данных проведена оценка параметров обменных процессов на границе океана и атмосферы в ураганных условиях.

В разделе 3.5. сделано заключение к Главе 3.

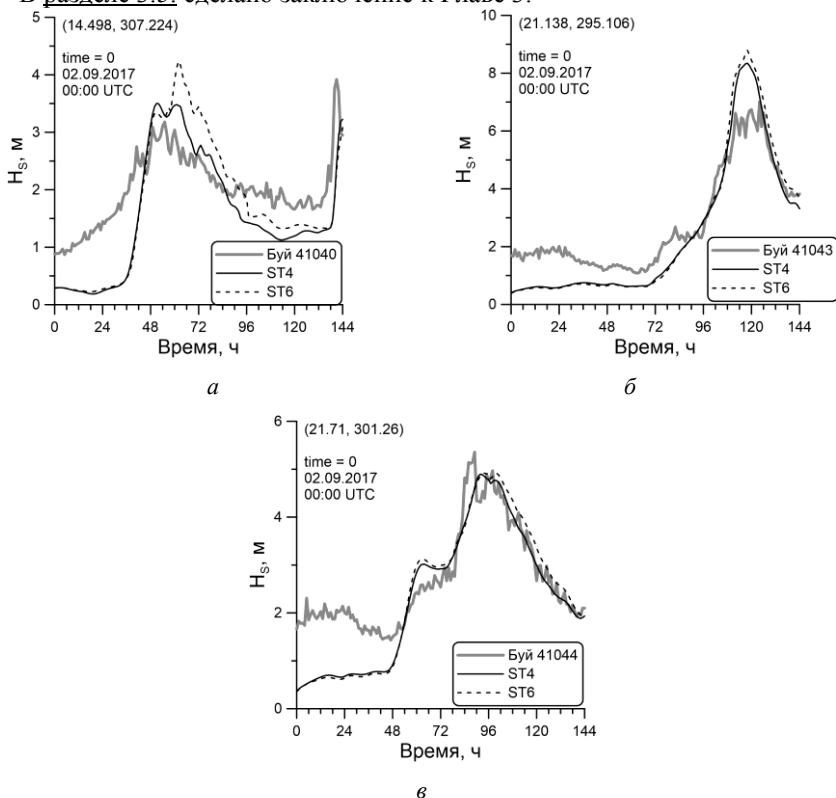
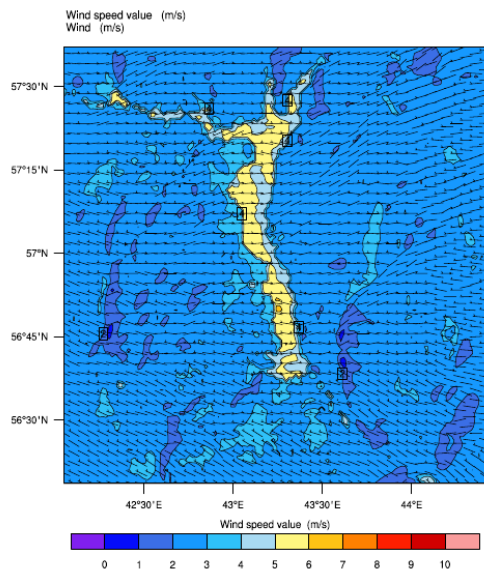


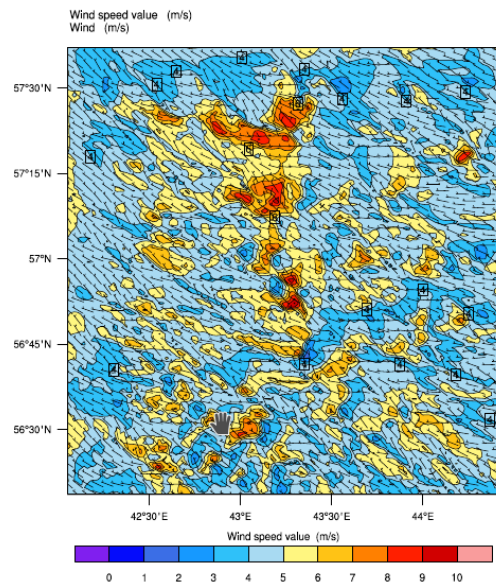
Рис. 6. Значительные высоты волн в точках расположения буев, рассчитанные в модели WW3 с параметризацией ST4 (сплошная черная линия), ST6 (прерывистая линия), и данные измерений буя (сплошная серая линия) в период 02/09/2017–08/09/2017. (*a*) – буй 41040, (*б*) – буй 41043, (*в*) – буй 41044.

Следует отметить, что в Главе 2 при моделировании ветрового волнения делалось допущение об однородности ветра над всей акваторией водоема с учетом временной изменчивости, задаваемой из эксперимента. Это допущение является источником возможных погрешностей численного эксперимента, и в Главе 4 реализованы способы уточнения задания ветровой накачки. В разделе 4.1. описано, что в действительности можно ожидать неоднородное распределение ветра, поскольку такие факторы, как вытянутая форма водоема, высокие берега, могут приводить к заметной пространственной изменчивости с масштабами порядка или менее 1 км. В разделе 4.2. обсуждаются способы задания ветровой накачки в волновые модели. В практике при моделировании ветровых волн на поверхности морей и океанов для задания ветровой накачки обычно используют данные реанализа. Они обладают пространственной изменчивостью, что позволяет более точно моделировать волнение. Но на акваториях внутренних водоемов средних размеров этот подход неприменим из-за слишком низкого пространственного разрешения. В разделе 4.3. подробно описана атмосферная модель WRF, которая используется для уточненные задания ветровой накачки с повышением детальности моделирования от решения уравнений Рейнольдса к применению метода крупных вихрей. В разделе 4.4. проведено моделирование распределения скорости ветра в рамках модели WRF. В разделе 4.5. получены результаты распределения скорости ветра над территории, содержащей Горьковское водохранилище, для ряда тестовых дней. Полученные значения скорости ветра над поверхностью воды выше аналогичных значений над сушей (Рис. 7), что согласуется с данными наблюдений. Этот результат подчеркивает преимущество использования ветра из атмосферной модели вместо данных реанализа, которые не имеют пространственной изменчивости, достаточной для условий внутренних вод и прибрежной зоны.

Проведено сравнение использования WRF для тестового дня 08.08.17 с данными реанализа CFSv2 самой высокой точности 0,205°, доступной на сегодняшний день, в точке измерений, а также с данными наутрных измерений. Сравнение показывает, что использование рассмотренных параметризаций WRF лучше согласуется с экспериментом, чем прямое использование реанализа, примерно в 2 раза при решении уравнений Рейнольдса (параметризации 1_1, 2_2, 5_5) и примерно в 3 раза при использовании вихреразрешающего моделирования (Рис. 8). Все примененные параметризации WRF показали хорошую временную изменчивость, отвечающую данным натурных измерений, как для модуля скорости (Рис. 8 а), так и для ее направления (Рис. 8 б). Для дальнейшего применения был выбран метод крупных вихрей, поскольку временная изменчивость, разброс данных по амплитуде прогнозируемого ветра наилучшим образом согласовывался с данными натурных измерений при подключении данного пакета LES.



a



б

Рис. 7. Распределение модуля и направления (обозначено векторами) скорости ветра над акваторией Горьковского водохранилища для тестового дня 08.08.17 в разные моменты времени.

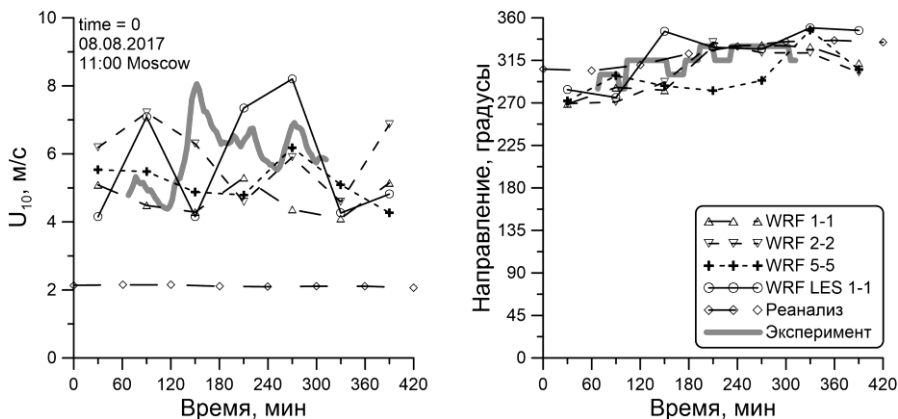


Рис. 8. Результаты расчета моделью WRF модуля скорости ветра (слева) и направления ветра (справа) с подключением разных параметризаций ППС и приповерхностного слоя атмосферы: 1_1 – MM5 similarity, 2_2 – Eta similarity, 5_5 – MYNN для Nakanishi & Niino, WRF LES в сравнении с данными натуральных измерений в тестовый день 08.08.2017.

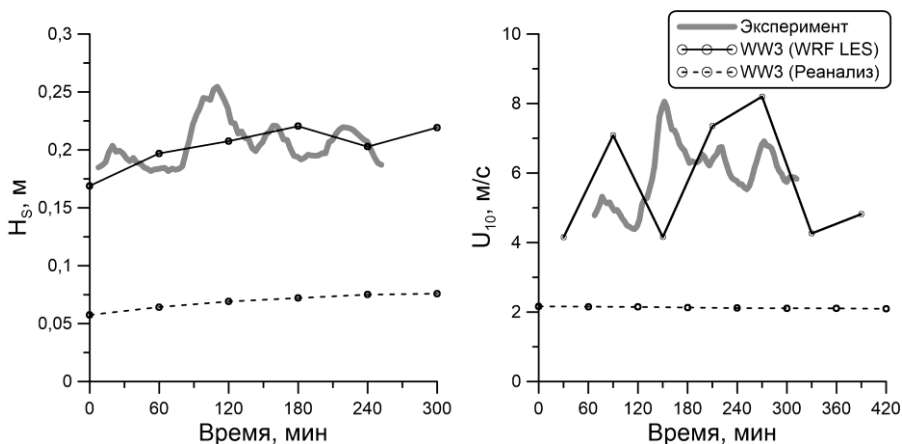


Рис. 9. Значительная высота волнения (слева), рассчитанная в модели WW3 с использованием накачки ветром (справа) WRF LES (сплошная черная линия) и с использованием данных реанализа CFSv2 (прерывистая линия), и экспериментальные данные (серая линия) для тестового дня 08.08.17.

В разделе 4.6. реализовано объединение (сопряжение) моделей WRF и WW3, состоявшее в применении атмосферной модели WRF, адаптированной к условиям коротких разгонов внутреннего водоема средних размеров на примере Горьковского водохранилища, и в последующем использовании полученного расчетного поля ветра на стандартной метеорологической высоте

U_{10} в качестве входных данных для модели WW3. Показано, что применение накачки ветром при помощи WRF LES при моделировании волнения в WW3 обеспечивает высокую пространственную изменчивость по сравнению с применением данных реанализа.

Также проведено сравнение расчетных данных (при накачке ветром WRF LES и с использованием данных реанализа CFSv2) с экспериментальными в точке, соответствующей точке наблюдений (Рис. 9). На примере полигона Горьковского водохранилища было показано, что использование объединенной модели WRF – WW3 для прогноза волнения повышает точность моделирования в сравнении с применением данных реанализа приблизительно в 3 раза и показывает наилучшее совпадение с данными натурального эксперимента.

В разделе 4.7. сделано заключение к Главе 4.

В Заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Предложена параметризация аэродинамического сопротивления взволнованной поверхности и четырехволновых нелинейных взаимодействий для адаптации волновой модели WAVEWATCH III к условиям коротких разгонов. На основе сравнения с данными натуральных измерений на полигоне Горьковского водохранилища показано, что в условиях коротких разгонов применение предложенной адаптации модели WAVEWATCH III повышает точность вычисления количества энергии, поступившей в систему, и ее перераспределение по спектру по сравнению с применением стандартных параметризаций. Показан существенный вклад ветровой накачки в эволюцию ветрового волнения на коротких разгонах волн.

2. На примерах расчета развития волнения на коротких разгонах в прибрежной зоне океана показано, что применение адаптации модели WAVEWATCH III повышает точность прогноза интегральных параметров волнения по сравнению со стандартными параметризациями.

3. Для описания атмосферной циркуляции над внутренним водоемом средних размеров применены два подхода к решению уравнений гидротермодинамики атмосферы в рамках мезомасштабной модели WRF. На примере Горьковского водохранилища показано, что повышение пространственного разрешения модели значительно улучшает прогноз приводного ветра по сравнению с данными реанализа. При этом подход, связанный с применением метода крупных вихрей в планетарном пограничном слое повышает точность прогноза скорости ветра по сравнению с подходом, основанном на решении уравнений Рейнольдса.

4. Для внутреннего водоема впервые предложена комбинированная система анализа ветра и волнения, полученная при объединении волновой и атмосферной моделей. На примере данных натуральных измерений показано, что для внутреннего водоема использование данной системы для прогноза волн

на коротких разгонах повышает точность моделирования средних параметров волнения в сравнении с применением данных реанализа о скорости ветра.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.weather.gov/greatlakes/>
2. Поддубный С., Сухова Э. Моделирование влияния гидродинамических и антропогенных факторов на распределение гидробионтов в водохранилищах: Руководство для пользователей // Рыбинск: Изд-во ОАО "Рыбинский дом печати". – 2002.
3. *The WAVEWATCH III Development Group (WW3DG)*. User manual and system documentation of WAVEWATCH III (R) version 5.16. // Tech. Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 2016. 326 pp. + Appendices.
4. Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, Gill D O, Barker D M, Dudhia M G, Huang X-Y, Wang W, and Powers J G. A Description of the Advanced Research WRF Version 3.// NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR. 2008. 113 pp.
5. <http://www.lakeeriewx.com/Guidance/Resources.html>
6. Jensen, R.E., Cialone, M. A., Chapman, R. S., Ebersole, B. A., Anderson, M., Thomas, L. Lake Michigan storm: Wave and water level modeling.// Engineer research and development center Vicksburg Coastal and Hydraulics lab. 2012.
7. Hesser, T. J., Cialone, M. A., Anderson, M. E. Lake St. Clair: Storm wave and water level modeling. // Engineer research and development center Vicksburg Coastal and Hydraulics lab. 2013.
8. SWAN team. SWAN – user manual. //Delft University of technology, Environmental Fluid Mechanics Section. 2006. 129 pp.
9. Gunter H., Hasselmann S., Janssen P.A.E.M. The WAM model cycle 4. // DKRZ WAM Model Documentation. Hamburg. 1992. 101 pp.
10. Owens, R. G., Tim, H.. ECMWF Forecast User Guide //ed. Reading: ECMWF. 2018.
11. Cavaleri, L., Alves, J.-H.G.M., Ardhuin, F., Babanin, A., Banner, M, Belibassakis, K., Benoit, M., Donelan, M., Groeneweg, J., Herbers, T.H.C., Hwang, P., Janssen, P.A.E.M., Janssen, T., Lavrenov, I.V., Magne, R., Monbaliu, J., Onorato, M., Polnikov, V., Resio, D., Rogers, W.E., Sheremet, A., McKee Smith, J., Tolman, H.L., van Vledder, G., Wolf, J., Young, I. Wave modelling – The state of the art // Progress in Oceanography. 2007. V. 75, № 4. P. 603 – 674.
12. Lynch P. The origins of computer weather prediction and climate 462 modeling // Journal of Computational Physics. 2008. V. 227. – P. 3431 – 3444.
13. Donelan M. A., Dobson F. W., Smith S. D., Anderson R. J.. On the Dependence of Sea Surface Roughness on Wave Development. // Journal of Physical Oceanography. 1993. V. 23, №9. – P. 2143 – 2149.

14. *Philips, O.M.* Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves // *Journal of Fluid Mechanics*. 1985. V. 156. P. 505 – 531.
15. *Miles, J. W.* On the generation of surface waves by shear flows // *Journal of Fluid Mechanics*. 1957. V. 3. P. 185 – 204.
16. *Hasselmann, K.* On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum Part 1. General theory // *Journal of Fluid Mechanics*. 1962. V. 12, №4. P. 481 – 500.
17. *Zakharov, V. E.* On domination of nonlinear wave interaction in the energy balance of wind-driven sea // *Low Temperature Physics*. 2010. V. 36, №8. P. 971 – 985.
18. *Hasselmann, S., Hasselmann, K.* Computations and Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity-Wave Spectrum. Part I: A New Method for Efficient Computations of the Exact Nonlinear Transfer Integral // *Journal of Physical Oceanography*. 1985. V. 15, №11. P. 1369–1377.
19. *Hasselmann, S., Hasselmann, Allender, J. H., Barnett, T. P.* Computations and Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity-Wave Spectrum. Part II: Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer for Application in Wave Models. // *Journal of Physical Oceanography*. 1985. V. 15, №11. P. 1378–1391.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1а. *Kuznetsova A.M., Baydakov G.A., Papko V.V., Kandaurov A.A., Vdovin M.I., Sergeev D.A., Troitskaya Yu. I.* Adjusting of wind input source term in WAVEWATCH III model for the middle-sized water body on the basis of the field experiment // *Advances in Meteorology*. 2016. v. 1, article ID 574602, pp. 1 – 13.
- 2а. *Кузнецова А.М., Байдаков Г.А., Папко В.В., Кандауров А.А., Вдовин М.И., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И.* Натурные исследования и численное моделирование ветра и поверхностных волн на внутренних водоемах средних размеров // *Метеорология и гидрология*. 2016. №2, с.85 – 97.
- 3а. *Kuznetsova A.M., Baydakov G.A., Papko V.V., Kandaurov A.A., Vdovin M.I., Sergeev D.A., Troitskaya Yu. I.* Field and numerical study of the wind-wave regime on the Gorky Reservoir. // *Geography, environment, sustainability*. 2016. Vol. 9, № 2. P. 19 – 37.
- 4а. *Kuznetsova A, Baydakov G, Sergeev D, Troitskaya Yu.* Development of a regional model based on adapted WAVEWATCH III and WRF models for the prediction of surface wind waves on the reservoir and wind // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 955, 012014.
- 5а. *Baydakov G.A., Kuznetsova A.M., Papko V.V., Kandaurov A.A., Vdovin M.I., Sergeev D.A., Troitskaya Yu. I.* Field Investigation and Numerical Simulation of Wind-Wave Interaction at the Middle-Sized Inland Reservoirs // *Physical and*

Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes (PMMEEP 2017). 2018. p. 112 – 124.

6а. Кузнецова А.М., Досаев А.С., Байдаков Г.А., Баландина Г.Н., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Подстройка схемы нелинейности Discrete Interaction Approximation (DIA) модели WAVEWATCH III к условиям внутреннего водоема средних размеров // Процессы в геосредах. 2018. № 3(17).– С. 258 – 160.

7а. Байдаков Г.А., Папко В.В., Вдовин М.И., Кандауров А.А., Кузнецова А.М., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Натурные исследования приводного ветра в условиях близкой границы водоема // Процессы в геосредах. 2018. № 3(17). С. 193 – 194.

8а. Kuznetsova A, Baydakov G, Dosaev A, Sergeev D and Troitskaya Yu. Wind waves modeling under hurricane wind conditions. // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1163, 012054.

9а. Kuznetsova A, Baydakov G, Sergeev D and Troitskaya Yu. High-resolution waves and weather forecasts using adapted WAVEWATCH III and WRF models. // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1163, 012031.

10а. Кузнецова А.М., Байдаков Г.А., Досаев А.С., Папко В.В., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Численное моделирование поверхностного волнения на внутренних водоемах. // Труды всероссийской конференции "Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития", г. Санкт-Петербург, 19 – 20 декабря 2017 г., 292 – 296.

11а. Кузнецова А.М., Байдаков Г.А., Папко В.В., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Моделирование поверхностного волнения на внутреннем водоеме с учетом пространственно неоднородной накачки ветром. // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва, 10 – 14 апреля 2017 г. [Электронный ресурс]. – Москва: ИО РАН, с. 134 – 136.

12а. Кузнецова А, Папко В. Численное моделирование ветрового волнения на внутренних водоемах средних размеров // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, Россия, 20 – 24 августа, (2015), с. 2124 – 2126.

13а. Kuznetsova AM, Zenkovich D, Papko V.V., Kandaurov A.A., Baydakov G.A., Vdovin M.I., Sergeev D.A., Troitskaya Yu. I. Simulation of surface wind waves on Gorky Reservoir with the tuned WAVEWATCH III model // 5ая Международная школа молодых ученых “Волны и вихри в сложных средах – 2014”, Москва 25 – 28 ноября, Труды конференции “Волны и вихри в сложных средах – 2014”, с. 244 – 247.

14а. Kuznetsova AM, Zenkovich D, Papko V.V., Kandaurov A.A., Baydakov G.A., Vdovin M.I., Sergeev D.A., Troitskaya Yu. I. Tuning of the WAVEWATCHIII model for the conditions of the lake-like basin of Gorky Reservoir // 5th International Geosciences Student Conference, Nizhny Novgorod,

28 July – 1 August 2014, Proceedings of “5th International Geosciences Student Conference”, pp.46 – 49.

15a. *Kuznetsova AM, Zenkovich D, Papko V.V., Kandaurov A.A., Baydakov G.A., Vdovin M.I., Sergeev D.A., Troitskaya Yu. I.* Simulation of wind waves on Groky Reservoir in the framework of WAVEWATCH III model. // Proceedings of the «Topical problems of nonlinear Wave Physics 2014», Nizhny Novgorod, Russia, July 17 – July 23, (2014), pp. 67 – 69.

КУЗНЕЦОВА Александра Михайловна

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПОВЕРХНОСТНОГО ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ
НА КОРОТКИХ РАЗГОНАХ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 10.07.2019 г.

Формат $60 \times 90 \frac{1}{16}$.

Усл. печ. л.1,5. Тираж 100 экз. Заказ №61(2019).

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