

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академии наук»

На правах рукописи



КУЗНЕЦОВА Александра Михайловна

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

Специальность: 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Троицкая Юлия Игоревна

г. Нижний Новгород

2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Методы моделирования поверхностного ветрового волнения.....	13
1.1. Введение.....	13
1.2. Исторический обзор методов моделирования волнения.....	14
1.3. Современные волновые модели.....	16
1.4. Валидация моделей.....	20
1.5. Описание волновой модели WAVEWATCH III.....	21
1.6. Атмосферные модели.....	23
1.7. Объединение моделей (coupling).....	26
1.8. Проблема создания прогнозов волнения на коротких разгонах.....	27
1.9. Описание натурального эксперимента.....	29
1.10. Заключение.....	33
Глава 2. Моделирование поверхностного ветрового волнения на озерной части Горьковского водохранилища в рамках адаптированной модели WAVEWATCH III.....	34
2.1. Введение.....	34
2.2. Моделирование волнения в рамках модели WAVEWATCH III.....	35
2.3. Конфигурация модели WAVEWATCH III.....	39
2.4. Адаптация ветровой накачки WAVEWATCH III.....	41
2.5. Подстройка параметризации нелинейности модели WAVEWATCH III.....	47
2.6. Спектры волнения.....	57
2.7. Заключение.....	59
Глава 3. Апробация адаптированной модели WAVEWATCH III в условиях коротких разгонов других акваторий.....	61
3.1. Введение.....	61
3.2. Апробация WAVEWATCH III в прибрежной зоне Финского залива.....	62
3.3. Апробация WAVEWATCH III в прибрежной зоне Персидского залива.....	67
3.4. Апробация WAVEWATCH III в экстремальных условиях тропического циклона	
3.4.1. Введение.....	70
3.4.2. Конфигурация модели.....	70

3.4.3. Оценка параметров обменных процессов между океаном и атмосферой.....	74
3.5. Заключение.....	77
Глава 4. Объединение волновой модели WAVEWATCH III и атмосферной модели WRF (Weather Research & Forecasting).....	78
4.1. Введение.....	78
4.2. Способы задания ветровой накачки.....	79
4.3. Мезомасштабная модель атмосферы WRF.....	81
4.4. Моделирование распределения скорости ветра в рамках модели WRF.....	85
4.5. Задание ветра в волновую модель WAVEWATCH III.....	87
4.6. Объединение моделей (1-way coupling).....	97
4.7. Заключение.....	99
Заключение.....	100
Список литературы.....	101
Список работ автора по теме диссертации.....	107

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие атмосферы и океана входит в число главных факторов, влияющих на климат планеты, наряду с солнечной активностью, концентрацией и составом парниковых газов в атмосфере и отражающими свойствами земной поверхности. Обмен между атмосферой и океаном происходит через тонкий сильно турбулизованный приводный слой атмосферы, параметры которого входят во все модели прогноза погоды и климата. Повышение пространственного разрешения в современных моделях циркуляции атмосферы и океана выдвигают требования повышения качества описания приводного слоя атмосферы с учетом неоднородности подстилающей поверхности, которая определяется степенью развития волнения, присутствием пены или льда, комплексного многофазного состава атмосферного воздуха при сильном ветре, когда обрушения волн приводят к образованию брызг, капель морской воды, которые после испарения влаги становятся кристаллами соли. Построение моделей таких сложных явлений неизбежно должно опираться на экспериментальные исследования. Отмечается большой вклад поверхностного волнения в климатическую систему Земли, его влияния на приводный слой атмосферы и диффузию примесей в океане [1, 2].

Поверхностные волны также оказывают существенное влияние на морскую деятельность, в том числе безопасность водного транспорта, добычу биоресурсов, развивающийся сектор возобновляемой энергетики (ветровые и волновые электростанции) и многое другое. На сегодняшний день метеорологическими службами производится регулярный прогноз гидрологической и метеорологической обстановки морей и океанов с использованием численных моделей. Создание прогностических моделей расчета ветра и ветрового волнения является одним из наиболее важных практических достижений в области геофизической гидродинамики [3]. Глобальные волновые модели, основанные на спектральном представлении волнового поля (WAVEWATCH III [4], SWAN [5], WAM [6]), а также модели циркуляции атмосферы (WRF [7], ECMWF [8]) обобщают все основные экспериментальные и теоретические достижения, полученные за прошедшие двести лет существования теории поверхностных волн [9] и исследования атмосферы [10] соответственно.

В 70-80-е годы уделялось значительное внимание изучению ветроволнового режима на акватории водохранилищ и озер. 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» [11]. 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 [4], [7] предлагают 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 и WAM [12], [13], [14].

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 [15]. 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.

Однако при моделировании ветра и волнения на акватории внутренних водоемов малых и средних размеров (с характерными линейными размерами не более 100 км) остается ряд проблем. Пространственное разрешение расчетных характеристик поверхностного волнения и параметров атмосферы, применяемое для глобальных прогнозов, варьируется в диапазоне 0.205° - $2,5^{\circ}$, что является достаточно грубым для внутренних водоемов. Попытки простого 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. Малые ветровые разгоны характеризуются более низкими по сравнению с условиями открытых морей и океанов значениями параметра возраста волнения [16]. К особенностям волн на малых разгонах водохранилищ средних размеров относится более интенсивная ветровая накачка, пропорциональная отношению скорости трения ветра (или скорости ветра на высоте 10 м) к фазовой скорости волны [4]. Еще одной особенностью является более сильная нелинейность, вызванная большой крутизной волн. 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.

Таким образом, возникает задача исследования особенностей развития поверхностного волнения на коротких разгонах, типичных для условий внутренних водоемов, на основе адаптации уже имеющихся глобальных волновых моделей, например, WAVEWATCH III [4], ориентированных, прежде всего, на океанские условия, к условиям внутренних водоемов.

Цели и задачи диссертационной 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 аэродинамического сопротивления C_D , и проведена верификация на основе измерений in-situ.
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 измерений in-situ.
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 измерений in-situ.

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 измерений in-situ.
5. 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.

Научная новизна работы

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 измерений in-situ на полигоне Горьковского водохранилища показано, что в условиях коротких разгонов предложенная адаптация модели WAVEWATCH III точнее вычисляет количество 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 подход, связанный с применением метода крупных вихрей в планетарном пограничном слое повышает точность прогноза скорости ветра по сравнению с подходом, связанным с решением уравнений Рейнольдса, при этом для обоих подходов полученные данные о скорости ветра значительно лучше соответствуют данным in-situ по сравнению с данными реанализа.
4. Для внутреннего водоема впервые предложена комбинированная система анализа ветра и волнения, полученная при объединении волновой и атмосферной моделей. На примере

данных in-situ 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 скорости ветра.

Практическая ценность работы

Результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы как для исследования фундаментальных проблем исследований процессов взаимодействия океана и атмосферы, так и для решения многих практических задач, включая создание прогнозов ветра и волнения на малых ветровых разгонах (на акватории внутренних водоемов и других акваториях со сходными параметрами). Результаты выполненных исследований показывают, что комплексные исследования ветроволнового режима внутренних водоемов позволяют совершенствовать методы численного моделирования и прогноза поверхностных волн, востребованные в различных направлениях морской деятельности, включая безопасность водного транспорта, добычу биоресурсов, развивающийся сектор возобновляемой энергетики (ветровые и волновые электростанции) и многое другое. Заинтересованными потребителями будут компании, занимающиеся: 1) транспортным и пассажирским судоходством, 2) разработкой и добычей полезных ископаемых в прибрежной зоне, 3) освоение биоресурсов Мирового океана, 4) разработкой и эксплуатацией источников возобновляемой энергии (ветровой и волновой) в прибрежной зоне, 5) технической поддержкой водных видов спорта на внутренних водоемах и в прибрежных территориях.

В 2016-2018 годах работа получила поддержку фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках программы «УМНИК-НТИ MariNet».

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 122 источников.

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

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 и публикации

Настоящая диссертационная работа является итогом исследований, проведенных автором в Институте прикладной физики РАН в 2013-2019 гг. Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах ИПФРАН и на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. 19-ая Нижегородская сессия молодых ученых, Нижегородская область, Россия (2014)
2. International symposium «Topical problems of nonlinear Wave Physics 2014», Nizhny Novgorod, Russia (2014)
3. 5th International Geosciences Student Conference, Nizhny Novgorod, Russia (2014)
4. European Geosciences Union General Assembly (EGU 2014), Vienne, Austria (2014)
5. 5ая Международная школа молодых ученых “Волны и вихри в сложных средах – 2014”, Москва, Россия (2014)
6. International Conference on Waves in Shallow water Environment (WISE meeting 2015), India, Goa (2015)
7. European Geosciences Union General Assembly (EGU 2015), Vienne, Austria (2015)
8. 20-ая Нижегородская сессия молодых ученых, Нижегородская область, Россия (2015)

9. Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, Россия (2015)
10. II Всероссийская научная конференция молодых ученых "Комплексные исследования Мирового океана" (КИМО 2017), г. Москва, Россия (2017)
11. International Conference on Waves in Shallow water Environment (WISE meeting 2017), Victoria, Canada (2017)
12. 22-ая Нижегородская сессия молодых ученых, Нижегородская область, Россия (2017)
13. International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond (CSP 2017), Moscow, Russia (2017)
14. Всероссийская конференция "Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития", г. Санкт-Петербург, Россия (2017)
15. XVIII Научная школа "Нелинейные волны - 2018", Нижегородская область, Россия (2018)
16. European Geosciences Union General Assembly (EGU 2018), Vienne, Austria (2018)
17. International Conference on Waves in Shallow water Environment (WISE meeting 2018), Tel Aviv, Israel (2018)
18. III Всероссийская научная конференция молодых ученых "Комплексные исследования Мирового океана" (КИМО 2018), г. Санкт-Петербург, Россия (2018)
19. International Conference on Wave Modeling "WAVEWATCH III tutorial", Brest, France (2018)
20. International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond (CSP 2018), Moscow, Russia (2018)
21. European Geosciences Union General Assembly (EGU 2019), Vienne, Austria (2019)

Автором проведены выездные семинары в Финском метеорологическом институте (FMI, Хельсинки, Финляндия) 19 октября 2017 года и в Институте исследований атмосферы (NCAR, Боулдер, США) 22 сентября 2014 года.

Публикации и личный вклад автора

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. 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 наблюдений in-situ, используемые для сравнения с расчетными данными, получены Г.А. Байдаковым.

Краткое содержание диссертационной работы

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

В Главе 1 будет приведен обзор некоторых значительных исследований, сформировавших современные представления о численном моделировании поверхностного волнения, приведены современные модели ветрового волнения, обсуждаются вопросы валидации этих моделей. Подробно описана модель WAVEWATCH III, на основе и с использованием которой проводятся исследования, приведенные в Главах 2, 3 и 4. Также описаны проблемы создания прогнозов волнения на коротких разгонах, послужившие предпосылкой для написания данной диссертационной работы.

В Главе 2 будут описаны предложенные способы учета особенностей моделирования волн на коротких разгонах. 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 должна быть осуществлена в два этапа: подстройка ветровой накачки и "интеграла столкновений". Диссипация из-за опрокидывания волн носит универсальный характер. В Главе 2 приводятся подстройка параметризации функции ветровой накачки и нелинейных четырехволновых взаимодействий.

Нужно отметить, что для подтверждения универсальности предложенной в Главе 2 адаптации модели WAVEWATCH III требуется провести расчеты в условиях коротких разгонов. 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.

Также 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. 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 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 Главе 4 приведены уточненные способы задания ветровой накачки из атмосферной модели WRF с повышением детальности моделирования от решения уравнений Рейнольдса к применению метода крупных вихрей.

В Заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ

1.1. Введение

В Главе 1 будет приведен обзор некоторых значительных исследований, сформировавших современные представления о численном моделировании поверхностного волнения, приведены современные модели ветрового волнения, обсуждаются вопросы валидации этих моделей. Подробно описана модель WAVEWATCH III, на основе и с использованием которой проводятся исследования, приведенные в Главах 2, 3 и 4. Также описаны проблемы создания прогнозов волнения на коротких разгонах, послужившие предпосылкой для написания данной диссертационной работы.

1.2. Исторический обзор методов моделирования волнения

Волны на поверхности океана - это доступная для наблюдения, но очень сложная в описании задача. Первые известные попытки количественного описания волнения были предприняты в 1805 году Бофортом. Он установил связь между определенной силой ветра и характерными высотами и периодами волн, созданная им шкала используется и в настоящее время. Однако составление прогнозов ветровых волн требовало большего количества теоретических и экспериментальных исследований всех физических процессов в атмосфере и океане, а развитие численного моделирования ветровых волн было напрямую связано с развитием ЭВМ [3].

Ранние прогнозы состояния моря создавались вручную на основе эмпирических соотношений между текущим состоянием моря и основными волнообразующими факторами: скоростью и направлением ветра, продолжительностью его действия, разгона и глубины моря. В 1950-х и 1960-х годах была заложена большая часть теоретической основы, необходимой для численного описания эволюции волн. Важным этапом в развитии прогнозирования волнения стал вывод о том, что случайный характер состояния моря лучше всего описывается спектральным подходом, в котором энергия волн была приписана как можно большему количеству волновых групп, каждая со своим направлением и периодом. Такой подход позволил составить комбинированные прогнозы ветрового моря и волн зыби. Первая численная модель, основанная на спектральном разложении состояния моря, была составлена в 1956 году Французской метеорологической службой и сосредоточена на Северной Атлантике [17]. Такие методы отражены в работах В.В.Шулейкина, И.С.Бровикова, Ю.М. Крылова [18], А.А.Иванова, А.П.Браславского. В мировой науке первые методы прогноза волнения представлены работами Свердруп и Манка [19], [20], Пирсона и Неймана [21], Лонге-Хиггинса [22].

Прогрессом в изучении физики ветроволнового взаимодействия стали работы Филлипса [23], Майлза [24], Хассельмана [25] и др., объединение результатов которых дало возможность создать теорию генерации волн турбулентным ветровым потоком, объясняющую, почему ветровое волнение носит вероятностный характер. Основой этой теории послужило уравнение баланса плотности волнового действия, предложенное Хассельманом в 1968:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \dot{x} N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta} N = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

Левая часть уравнения описывает кинематику волн, \dot{x} - групповая скорость, k - волновое число, θ - угловое направление, σ - круговая частота. В правую часть входят динамические слагаемые: S_{nl} описывает 4х-волновое взаимодействие, S_{in} - нарастание

волн под действием ветра (ветровая накачка) и S_{dis} - диссипацию, обусловленную главным образом обрушением волн.

На основе уравнения баланса спектральной энергии было разработано много версий волновых моделей. В 1985 г. международная рабочая группа SWAMP составила классификацию созданных моделей ветрового волнения, основанную на способе учета слабонелинейного переноса энергии в спектре волн. Волновые модели первого поколения не рассматривали нелинейные волновые взаимодействия. Модели второго поколения, доступные к началу 1980-х годов, параметризировали эти взаимодействия. Модели второго поколения подразделялись на «связанные дискретные» и «связанные гибридные» (одновременно параметрические и дискретные). В связанных гибридных моделях предполагалось, что спектр волн, регулируемый нелинейными взаимодействиями, резко принимает универсальный квазиравновесный вид, в котором только один параметр (обычно энергия) должен быть определен как медленно меняющийся. При этом волны зыби, не зависящие от нелинейных взаимодействий, учитывались как суперпозиция независимых компонент волн аналогично моделям первого поколения. В связанных дискретных моделях применялось дискретное описание спектра, однако описание нелинейных взаимодействий было параметризовано.

Скачок, приведший к разработке современных моделей произошел благодаря созданию международной рабочей группы WAM, в которую входили Г.Комен, Л.Кавалери, М.Донелан, К.Хассельман, С.Хассельман, П.Янссен. Ими был определен ряд главных задач, необходимых для создания современной модели ветрового волнения:

- Создать точную аппроксимацию интеграла столкновений, сохраняющую кубическую структуру оригинального выражения оператора.
- Совместно с функцией источника ветровой накачки разработать функцию диссипации волн.
- Математическое решение задачи реализовать на сферических координатах для возможности глобального применения.
- Добавить дополнительные источники и стоки для учета перехода к приближению мелкой воды.

Данные задачи были реализованы и представлены моделью WAM, которая уже характеризовалась как модель третьего поколения. Современные модели третьего поколения явно представляют всю физику, относящуюся к развитию морского состояния и постоянно совершенствуются.

1.3. Современные волновые модели

Общий принцип работы моделей третьего поколения одинаков и состоит из подготовки начальных данных, расчета модели и обработки выходных данных. В качестве начальных и граничных условий волновая модель требует информацию, описывающую текущее состояние моря. Важным входным параметром является «форсинг» модели ветровым полем: изменяющимся во времени распределением скорости и направлений ветра. Наиболее распространенными источниками ошибок в результатах волновой модели являются именно ошибки в поле ветра [26]. Данные о ветре, как правило, предоставляются из отдельной атмосферной модели из оперативного метеорологического центра, подробнее это будет обсуждаться ниже. Также важными входными параметрами являются течения. Кроме того, влияние на характер волнения оказывают лёд и айсберги, и все современные оперативные глобальные модели волн включают учет, по крайней мере, морского льда.

Таким образом, современные модели ветровых волн используются для создания прогнозов или ретроспективного анализа (диагноза). Различия в результатах расчетов возникают в первую очередь из-за различия в форсинге ветром. Кроме того, важен учет данных о морском льде, различиях в параметризации физических процессов, использовании ассимиляции данных и связанных с ними методов усвоения этих данных, используемые численные методы решения уравнения эволюции плотности волнового действия.

На следующем шаге, когда начальные данные подготовлены, происходит непосредственный расчет прогноза ядром модели. Состояние моря описывается как спектр; поверхность моря может быть разложена на волны с различными частотами по принципу суперпозиции. Волны также разделены их направлением распространения. Размер модели домена может варьироваться от глобального до малого регионального. Меньшие домены могут быть вложены в глобальный домен, чтобы обеспечить более высокое разрешение в интересующей области, это называется «нестингом» доменов. Морское состояние развивается в соответствии с физическими уравнениями, основанными на спектральном представлении о сохранении волнового действия, которые включают в себя: распространение (адвекцию) волны, преломление (по батиметрии и течениям), выход на мелководье (рефракция), функцию источника (накачка ветром, нелинейный перенос энергии, диссипация из-за обрушений волн). При необходимости учета эффектов мелководья также может быть подключен ряд других функций источника.

Кроме того, возможна ассимиляция данных, при которой информация о данных измерений буя или спутникового альтиметра может быть использована и в последующие моменты времени, ассимилирована в модель, то есть объединена с предположением о предыстории предыдущего прогноза для создания наилучшей оценки текущих условий. На практике многие системы прогнозирования полагаются только на предыдущий прогноз без какой-либо ассимиляции наблюдений, однако показано, что ассимиляция данных о волнении в модели на каждом временном шаге может улучшить результат, и в настоящее время ведется активная деятельность по разработке методов усвоения этих данных волновыми моделями [27].

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. Значительная высота волн – это термин, впервые введенный в методе прогноза Свердрупа – Манка – Бретшнайдера, определяемый как средняя высота из одной трети наибольших наблюдаемых волн:

$$H_S = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j \quad (2)$$

где j является не порядковым номером в записи (т. е. не последовательностью во времени), а номером ранга волны, основанным на высоте волны (т. е. $j = 1$ является самой высокой волной, $j = 2$ - вторая по величине волна и т. д.). Значительная высота волны близка к высоте преобладающих волн, определяемых визуально с судов и является важным параметром для судоходства. Многие волновые параметры, в том числе и значительная высота волнения, при расчете вычисляется через спектральные моменты:

$$m_n = \int f^n S(f) df \quad (3)$$

Значительная высота волн выражается следующим образом:

$$H_S = H_{m_0} = 4\sqrt{m_0} \quad (4)$$

А средний период волн определяется как:

$$T_m = T_{m_{-10}} = \frac{m_{-1}}{m_0}. \quad (5)$$

В настоящее время в мире широко используются три современные модели числовых волн. Это WAM (WAveModel, [6]), SWAN (Simulation WAves Nearshore, [5]) и WAVEWATCH III (WAVEWATCH III™, [4]). Основное сходство этих моделей заключается в использовании уравнения баланса волнового действия с источниками и стоками, но они различаются в численной реализации и параметризации физических

процессов. WAM построен на одном наборе исходных функций источника, тогда как SWAN и WAVEWATCH III (WW3) имеют большой набор различных исходных параметризаций функций источника, доступных пользователю.

Волновая модель WAM была первой прогностической волновой моделью третьего поколения, где двумерному волновому спектру позволялось свободно развиваться без ограничений на спектральную форму. Модель претерпела ряд программных обновлений с момента ее создания в конце 1980-х годов. Последний официальный релиз - Цикл 4.5, поддерживаемый немецким центром Гельмгольца, Geesthacht. На сегодняшний день Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) обеспечивает глобальный волновой прогноз, созданный WAM [28].

Модель WW3 является основой для системы оперативного прогнозирования волн в Национальном управлении океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) в США. Эта система создает прогнозы на «глобальной сетке» с разрешением приблизительно 50 км и прогнозы с вложенными региональными областями для океанических бассейнов северного полушария с разрешением до 1 км. Модель WW3 является развитием модели WAM за счет внедрения большего количества различных параметризаций физических процессов и предоставления пользователю управления, возможности подключения той или иной параметризации. До 2008 года модель применялась лишь в условиях открытых морей и океанов, однако сейчас область ее применимости распространяется и на прибрежную зону благодаря более подробному описанию функции источника и диссипации, отражающую эффекты мелководья.

SWAN (Simulating WAVes Nearshore) - это спектральная волновая модель третьего поколения, разработанная в Технологическом Университете Делфт (Нидерланды). Основная особенность модели состоит в методе решения спектрального уравнения баланса волнового действия: модели WAM и WW3 решают это уравнение на океаническом масштабе в явном виде, что влечет за собой необходимость существенно уменьшать горизонтальный шаг в вычислительной области для прибрежной зоны, а SWAN применяет неявный алгоритм, который является более устойчивым и менее зависимым от горизонтального шага, и, следовательно, более экономичным [29]. Модель SWAN применяется как оперативная модель для региональных прогнозов волн, например, в Мексиканском заливе в Университете Техаса A & M.

Программный код вышеперечисленных моделей находится в открытом доступе, что делает возможным использовать модель не только для практических, но и для научных целей. Это может быть как отладка численных схем, так и внедрение новых

параметризаций, апробация модели в новых условиях и регионах. Для более удобного использования в научных целях модель WW3 с 2013 года стала «международной» [30] моделью: группа авторов-исследователей представлена сотрудниками разных институтов из более 8 стран, создана удобная платформа для обмена нововведениями, наиболее удачные из которых включаются в новый официальный релиз модели, выпускаемый в среднем раз в 2 года.

В России для расчета прогноза погоды и волнения была разработана в ИО РАН и численно реализована в ГОИНе модель РАВМ: российская атмосферно-волновая модель [31], [32]. Главной особенностью модели является способ учета члена, описывающего нелинейный обмен энергии в спектре волн. Интеграл нелинейных взаимодействий сводится к дифференциальному виду регулярной процедурой разложения исходного интеграла в ряд по малому параметру – «параметру узконаправленности», который оказывается малым для реальных функций углового распределения энергии в двумерном спектре волн. Такое решение впервые было предложено в работах В.Е.Захарова и развито М.М.Заславским [33]. Такой подход к описанию члена нелинейных взаимодействий называется узконаправленным приближением волнового спектра и позволяет выделить модель РАВМ в более совершенное «четвертое» поколение волновых моделей.

Кроме того, в России в рамках вычислительных технологий Гидрометцентра России работает также глобальная спектрально-параметрическая модель AARI-PD2, разработанная в ААНИИ совместно с СПО ГОИН.

1.4. Валидация моделей

Проверка качества работы модели, или ее валидация, является необходимым процессом: сравнение прогнозов волновой модели с наблюдениями позволяет определить характеристики модельных недостатков и определения областей для улучшения. Важным требованием для оценки модели волнения является наличие надежных измерений параметров волнения и ветра. Данные для валидации модели могут быть получены как путем *in-situ* наблюдений, полученных от океанских стационарных буев, судов добровольных наблюдений (СДН) и нефтяных платформ, так и, что занимает значительную часть в современной глобальной плотности наблюдений, данных спутниковой альтиметрии. Однако даже при такой обширной сети наблюдений за волнением и ветром по-прежнему сохраняются проблемы, связанные с недостаточной освещенностью Мирового океана, поскольку существенно выросли потребности к качеству, полноте и форматам представления данных о волнении. Решение этих задач требует развития и совершенствования методов наблюдений за ветром и волнением и методов их прогнозирования.

На сегодняшний день общепризнанным испытательным стендом для моделей является проведение объемных вычислений для диагноза (ретроспективного прогноза) волнения. Такие работы проводятся регулярно, и для модели WW3 они представлены, например, [34], [35], [36].

1.5. Описание волновой модели WAVEWATCH III

Модель WW3 разработана в Национальном центре атмосферы и океана США (NOAA), программный комплекс находится в открытом доступе и активно используется в оперативной метеорологии. Эта модель основана на численном решении уравнения Хассельмана (1) для спектральной плотности волнового действия N .

Левая часть уравнения описывает кинематику волн, а в правую входят слагаемые, описывающие нарастание волн под действием ветра S_{in} , диссипацию S_{dis} , обусловленную главным образом обрушением волн, и 4х-волновое взаимодействие волн S_{nl} . В модели возможен учет процессов ослабления волн из-за донного трения, трехволнового взаимодействия на мелководье, рассеяния энергии на донных неоднородностях, влияние течений, приливов, наличия островов подсеточного масштаба и ледового покрова. Предусматривается возможность построения вложенных сеток с меняющимся разрешением в различных областях и с автоматическим связыванием расчетного процесса на границах областей. Реализуется распараллеливание вычислений средствами OpenMP и средствами MPI.

Программный код волновой модели позволяет при заданных топографических и батиметрических данных рассчитывать изменение спектральной плотности волнового действия во времени по входным данным (например, скорость и направление приводного ветра и разность температур вода–воздух) и получать на выходе статистические характеристики: спектры волнения, значительные высоты волн, средние периоды и другие.

Счет может быть произведен с подключением различных численных схем и параметризаций физических процессов. Описание используемых в работе параметризаций будет дано в Главе 2.

Стоит отметить, что модель WW3 опирается на уравнение Хассельмана, описывающее эволюцию спектра поверхностных волн на воде с учетом слабых четырехволновых взаимодействий. Этот подход широко используется в мировом научном сообществе, внедрен в оперативное использование, требует сравнительно малого компьютерного времени. Однако необходимо учитывать, что уравнение Хассельмана описывает эволюцию фазовоосредненных величин. При этом существуют методы, учитывающие фазы взаимодействующих гармоник (уравнение Захарова [37]). Также используется обобщение уравнения Хассельмана с учетом отклонений четырехволнового взаимодействия от точного резонанса [38], что приводит к эволюции спектра на «быстром» временном масштабе, $O(\varepsilon^{-2})$, где ε - крутизна волны. Однако, как отмечают

авторы [38], одновременно с тем, что данный метод требует гораздо большего компьютерного времени, он не приводит к существенным улучшениям прогнозируемых средних волновых параметров, внося изменения лишь в форму спектра. В данном исследовании мы не будем использовать подход, описанный в [38] и остановимся на использовании уравнения Хассельмана.

1.6. Атмосферные модели

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. Для учета сложной орографии прибрежных вод и замкнутых бассейнов создаются численные модели прогнозирования погоды, которые используют математические модели атмосферы и океана для прогнозирования погоды на основе текущих погодных условий.

Первые попытки создания численных прогнозов погоды датируются 1920-ми годами, но только одновременно с бурным развитием компьютерного моделирования в 1950-х годах численные прогнозы погоды стали давать реалистичные результаты. На сегодняшний день существуют глобальные и региональные модели, использующие в качестве исходных данных, необходимых для инициализации расчета, текущие метеорологические наблюдения, передаваемые из радиозондов, метеорологических спутников и других систем наблюдений. Исходные данные должны состоять из значений данных для ряда конкретных «прогностических» метеорологических полей, т.е. тех полей, которые определяют будущую эволюцию модели. Поля, изменяющиеся в пространстве, требуются в форме, используемой моделью, например, в каждой точке пересечения на регулярной сетке долгот и широт в момент времени, соответствующий текущему состоянию. Однако обычно имеющиеся данные наблюдений содержат не все поля, необходимые модели, при этом могут включать в себя и другие дополнительные поля; эти данные также имеют разное пространственное разрешение и могут быть измерены в несколько моментов времени, а не единожды, а также подвержены ошибкам наблюдений. Поэтому метод ассимиляции таких данных используется в дальнейшем для получения *анализа* исходного состояния, то есть наилучшего соответствия численной модели и имеющихся натурных данных с учетом ошибок в модели и в данных. Последующее включение данных анализа в расчет численной модели представляет собой так называемый *реанализ* (*ретроспективный анализ*, *повторный анализ*), который может использоваться для метеорологических и климатологических исследований. Большое количество различных реанализов, которые в настоящее время создаются в разных центрах исследований атмосферы или гидрометеорологических институтах обусловлено главным образом тем, что в последние годы появились спутниковые данные с глобальным охватом. В свободном доступе находятся спутниковые данные о ветре и волнении,

которые обеспечивают возможность создания глобальных карт, необходимых для удовлетворения широкого спектра запросов потребителей. К наиболее широко используемым типам реанализа относятся ERA-Interim, созданные в ECMWF, а также реанализы CFSR Reanalysis, разработанные в NCEP [39].

<u>Name</u>	<u>Source</u>	<u>Domain</u>	<u>Period of Record</u>	<u>available timestep(s)</u>	<u>available resolution</u>	<u>available format(s)</u>
<u>Arctic System Reanalysis (ASR)</u>	Byrd Polar Research Center, The Ohio State University/ David Bromwich, NCA R, CIRES, U Illinois	<u>Arctic</u>	2000/01 to 2012/12	Sub-daily, Monthly	ASR v1; 30 km; 71 levels; 10hPA top, ASR v2; 15 km; 71 levels; 10hPA top	<u>netCDF</u>
<u>CERA-20C: ECMWF's Coupled Ocean-Atmosphere Reanalysis of the 20th Century</u>	ECMWF	<u>Global</u>	1901/01 to 2010/12	Sub-daily, Daily, Monthly	~ 125km; 160 x 320; 91 model levels/ 37 pressure levels / 16 potential temperature levels, and the 2 PVU potential vorticity level	netCDF, GRIB
<u>Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)</u>	NCEP	<u>Global</u>	1979/01 to 2017/11	Sub-daily, Monthly	.5°x.5° & 2.5°x2.5°, 0.266 hPA top	<u>GRIB</u>
<u>ERA-15</u>	ECMWF	<u>Global</u>	1979/01 to 1993/12	Sub-daily, Monthly	T106, 2.5 x 2.5	<u>GRIB</u>
<u>ERA-20C: ECMWF's atmospheric reanalysis of the 20th century (and comparisons with NOAA's 20CR)</u>	ECMWF	<u>Global</u>	1900/01 to 2011/01	Sub-daily, Daily, Monthly	~ 125km; 160 x 320; 91 model levels/ 37 pressure levels / 16 potential temperature levels, and the 2 PVU potential vorticity level	netCDF, GRIB
<u>ERA-Interim</u>	ECMWF	<u>Global</u>	1979/01 to 2018/03	Sub-daily, Daily, Monthly	0.75°x0.75°x60 lev 0.1 hPA top	netCDF, GRIB
<u>ERA40</u>	ECMWF	<u>Global</u>	1957/09 to 2002/08	Sub-daily, Monthly	2.5°x2.5° / 1.125°x1.125°; 60 levels 0.1 hPA top	netCDF, GRIB
<u>JRA-25</u>	Japanese Meteorological Agency	<u>Global</u>	1979/01 to 2004/12	Sub-daily, Monthly	1.125x1.125/2.5x2.5; 0.4 hPA top	<u>GRIB</u>
<u>JRA-55</u>	Japanese Meteorological Agency	<u>Global</u>	1957/12 to 2018/01	Sub-daily, Monthly	T319 x 60 levels, 0.1 hPA top	<u>GRIB</u>
<u>NASA MERRA</u>	NASA	<u>Global</u>	1979/01 to 2016/11	Sub-daily, Monthly	0.5° x 0.667° x 72, 0.01 hPA top	netCDF, HDF

NASA's MERRA2 reanalysis	NASA Global Modeling and Assimilation Office	Global	1980/01 to 2017/11	Sub-daily, Daily, Monthly	½° latitude by ⅜° longitude by 72 model levels (also interpolated to 42 pressure levels)	netCDF
NCEP NARR	NCEP	North America	1979/01 to 2018/05	Climatology, Sub-daily, Monthly	32km	GRIB
NCEP Reanalysis (R2)	NCEP,DOE	Global	1979/01 to 2018/05	Sub-daily, Daily, Monthly	2.5°x2.5° 28 levels 3 hPA top	netCDF, GRIB
NCEP-NCAR (R1): An Overview	NCEP,NCAR	Global	1948/01 to 2018/05	Sub-daily, Daily, Monthly	2.5°x2.5°; 3 hPA top	netCDF, GRIB
NOAA 20th-Century Reanalysis. Version 2 and 2c	NOAA ESRL,CIRES CDC / Gil Compo	Global	1850/12 to 2014/12	Sub-daily, Daily, Monthly	2°x2°, 28 levels 10 hPA top	netCDF, GRIB

Таблица 1. Данные реанализа. Заимствовано из <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/atmospheric-reanalysis-overview-comparison-tables>.

В ФГБУ «Гидрометцентр России» используется несколько оперативных технологий выпуска гидродинамических прогнозов глобальных метеорологических полей, включая поля ветра, на основе глобальных моделей атмосферы с различным пространственным разрешением. Выходная продукция доступна внутренним пользователям через базы данных Гидрометцентра России, на файл-серверах ГИС-МЕТЕО. Внешним пользователям прогнозы распространяются в кодах GRID и GRIB.

Математические модели, основанные на одних и тех же физических принципах, могут быть использованы для создания краткосрочных прогнозов погоды или долгосрочных прогнозов климата; последние широко применяются для понимания и прогнозирования изменения климата. При этом совершенствование региональных моделей позволило значительно улучшить глобальные прогнозы, например, прогнозы тропических циклонов и прогнозы качества воздуха. К наиболее распространенным моделям регионального прогноза погоды относятся европейская модель COSMO [40] и модель WRF-ARW [7], разработанная в США.

1.7. Объединение моделей (Coupling)

Новым направлением исследования является также создание так называемых «связанных» моделей, “coupled models”. Идея состоит в том, что ветровые волны влияют на изменение атмосферных свойств приповерхностного ветра и потоков тепла посредством шероховатости поверхности [41]. Модели с двухсторонним объединением (“2-way coupling”) позволяют учитывать двустороннее воздействие системы «атмосфера-вода». Например, в европейской системе среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) объединение атмосферной и волновой моделей реализовано при помощи обмена параметром Чарнока, который контролирует шероховатость поверхности моря. Это позволяет расчетным атмосферным параметрам реагировать на изменения шероховатости водной поверхности.

1.8. Проблемы создания прогнозов на коротких разгонах

Нужно отметить, что численные модели третьего поколения приспособлены к океаническим условиям, и прогнозирование волн в прибрежных районах или на акваториях крупных или средних водоемов является сложной и актуальной задачей. Первые численные прогнозы имели грубые пространственные разрешения и были в основном пригодны для моделирования условий открытого моря [42]. Существующие операционные системы и вычислительные средства позволили увеличить горизонтальное разрешение систем прогнозов волн, тем самым предоставляя точные прогнозы волн в более сложных районах с малыми разгонами волн.

На сегодняшний день волновые модели применяются в разных условиях. Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) создает глобальный волновой прогноз на основе модели WAM [28]. Модель WW3 также обеспечивает глобальный прогноз, создаваемый Национальным управлением океанических и атмосферных исследований (NOAA) [26]. Однако наряду с глобальными прогнозами модели используются для составления прогнозов в прибрежной зоне. Для волнового прогноза на португальском побережье используются одновременно WAM и SWAN [43]. В работе [44] проведен сравнительный анализ расчета волновых моделей в Северо-западной Атлантике в условиях малых разгонов тропического циклона.

Последние исследования направлены на все большую детализацию расчетов, и модели проходят апробацию в полузакрытых бассейнах. В работе [45] оценена производительность WW3 в Средиземном море, а WAM валидирован, например, в Балтийском море [46] и в Средиземноморье [47]. Были также созданы региональные модели, охватывающие только части более крупного бассейна, включая прибрежные районы [48], [49]. Проводились также исследования отдельных малых районов как для отображения энергетических ресурсов волн [50], [51], так и для оценки подходящих конфигураций модели для оперативных прогнозов [52], [53], [54].

При этом особую актуальность на сегодняшний день приобретает изучение и предсказание волнового режима на внутренних водоемах средних размеров. Это следующий шаг в направлении детализации расчета волнового поля.

Волны на воде – это основной источник эрозии берегов водоема, а правильный прогноз волнения определяет безопасность речного судоходства. Кроме того, процессы обмена импульсом, теплом и влагой над водоемом определяют микроклимат прилегающих территорий.

Изучение волнового режима внутренних водоемов средних размеров актуально в

том числе из-за малого количества экспериментальных данных. Редкие примеры таких экспериментов представлены в исследованиях [55] и [56]. Результаты серии натуральных экспериментов, проведенных нами на Горьковском водохранилище, показали необходимость учета ряда особенностей волнового режима внутренних водоемов средних размеров для создания точных волновых прогнозов.

Как правило, численное описание волн в озерах и водохранилищах средних размеров основывается на эмпирических моделях: например, в работе [57] приводится блок для численного описания волнения на Рыбинском и Иваньковском водохранилищах, основанный на эмпирических формулах, а в работе [58] также при помощи эмпирических соотношений изучается режим волнения на Братском водохранилище. Но эмпирические соотношения основаны на усредненных характеристиках, которые не могут предсказать важные для многих задач оперативной метеорологии экстремальные условия, и поэтому необходимо использовать современные численные прогнозные волновые модели.

Есть примеры успешного применения волновых моделей на крупных озерах. Так, WW3 успешно используется для волновых прогнозов на Великих озерах в США [59]. WW3 и SWAN были применены к Каспийскому морю и Ладожскому озеру для получения ретроспективного прогноза ветра и волнения [60]. В работе [14] были получены первые результаты применения модели WAM для прогнозирования волнения на водоеме средних размеров (с линейным размером 10 – 100 км).

1.9. Описание натурального эксперимента

Одна из проблем подстройки численных моделей к условиям коротких разгонов внутренних водоемов - это малое количество экспериментальных данных, которые могут быть использованы для верификации. Редкие примеры таких экспериментов представлены в исследованиях [56], [55]. В настоящей работе мы приводим адаптацию модели WW3 к условиям внутреннего водоема средних размеров на примере входящего в Волжский каскад Горьковского водохранилища. Методы натурального эксперимента, проведенного нами на Горьковском водохранилище, отличаются от используемых в [56], [55], и сосредоточены на изучении воздушного потока в непосредственной близости от поверхности воды.

На Горьковском водохранилище (р. Волга) группой отдела 230 ИПФ РАН проводились натурные исследования с 2012 года и продолжаются по настоящий момент в летние сезоны, когда водохранилище не покрыто льдом. Водоохранилище имеет вытянутую форму (протяженность около 85 км, ширина 6-10 км), глубина водохранилища составляет 4-20 метров, глубина в области измерений – 9-12 метров в зависимости от сезона и выбора рабочей точки. Распределение вероятности значений возраста волн и безразмерных разгонов волн, наблюдаемое в эксперименте, приведено на Рис. 1 а и б соответственно.

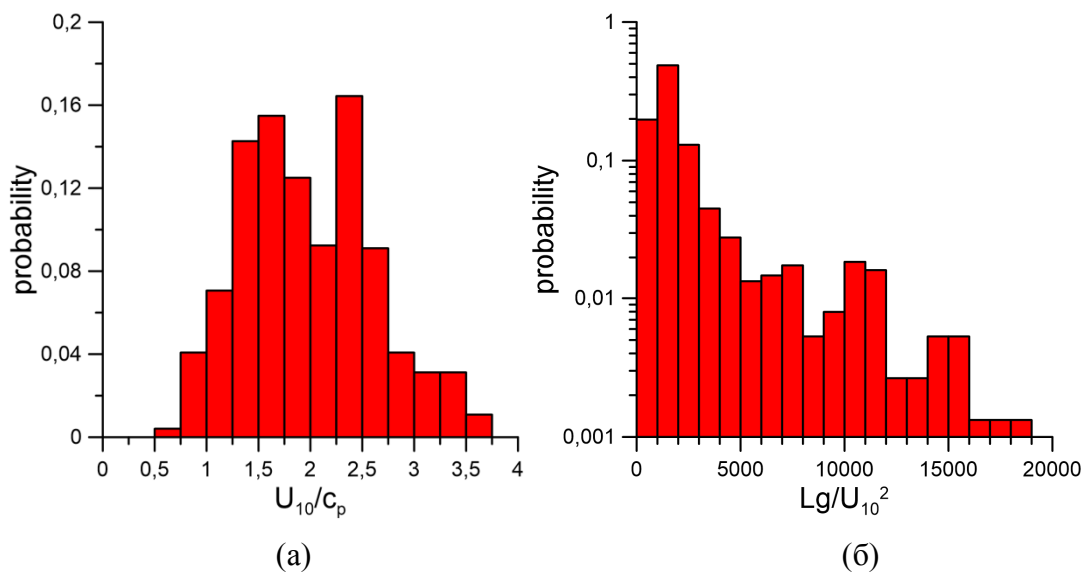


Рис. 1. Распределение вероятности значений параметра возраста волн (а) и безразмерных разгонов волн (б), наблюдаемое в эксперименте.

Среднее наблюдаемое значение параметра возраста волнения, $\Omega = U_{10}/c_p$ составляет 2, дисперсия 0,7. Разгон волн составлял 6-8 км, что при наблюдаемых ветрах соответствовало 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,

полностью развитое волнение наблюдается при разгоне 20000-25000. Зависимость параметра возраста волнения от безразмерного разгона, наблюдаемая в эксперименте, приведена на Рис. 2. Волны, обладающие короткими разгонами, находятся в левом верхнем квадранте.

По данным наблюдений была построена аппроксимация ("best fit"):

$$\frac{U_{10}}{c_p} = 26 X^{-0,35} \quad (6)$$

которая в приведенном интервале параметров практически не отличается от аппроксимации, полученной в эксперименте JONSWAP [61] в океанских условиях:

$$\frac{U_{10}}{c_p} = 22 X^{-0,33} \quad (7)$$

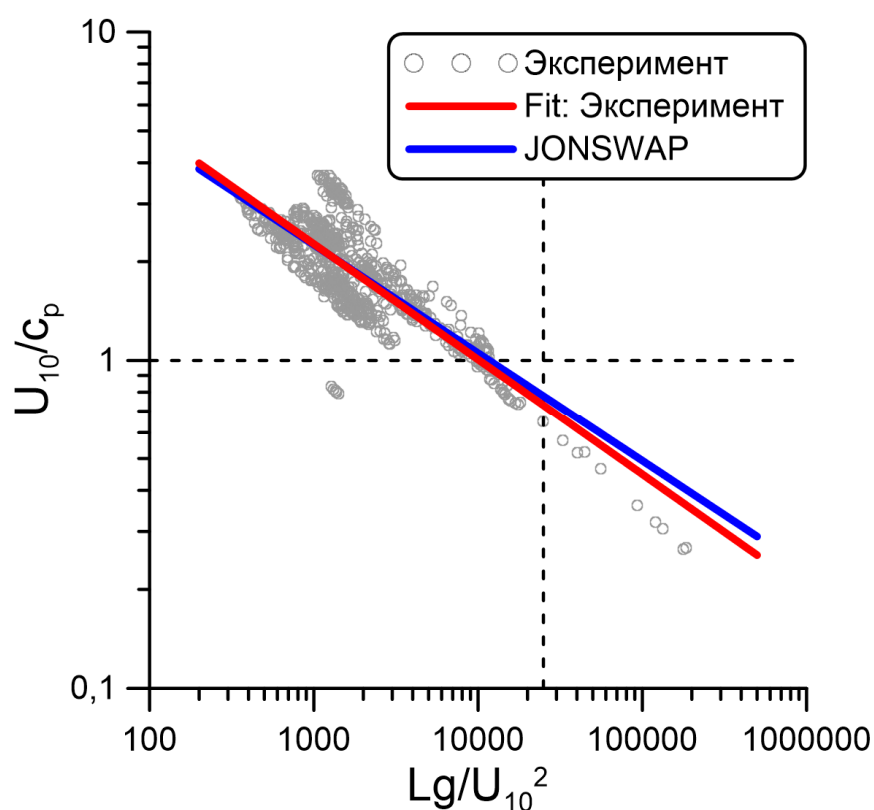


Рис. 2. Зависимость параметра возраста волнения от безразмерного разгона, наблюдаемая в эксперименте. Красной прямой обозначена аппроксимация по наблюдаемым данным, синим - аппроксимация, полученная в эксперименте JONSWAP [61].

Для сопоставления с результатами численного моделирования использовались данные натуральных измерений, проведённых в 2014-2017 годах. Измерительная аппаратура размещалась на автономной буйковой станции – оригинальной разработке коллектива авторов на базе океанографической вехи Фруда. Веха представляет собой мачту, полупогруженную в воду и удерживаемую в вертикальном положении поплавком вблизи поверхности и грузом на глубине. Общая длина вехи 12 м, длина надводной части – 5.3 м.

Резонансная частота вертикальных колебаний – 0,25 Гц, что соответствует длине волны 25 м. По сравнению с измерениями, описанными в [62], вежа была модифицирована. Чтобы исключить влияние судна на процесс измерения, измерительный комплекс был автономизирован. Вежа удерживается якорем и неподвижна при стабильном направлении ветра. Резкое изменение направления ветра вызывает движение вежи в радиусе 20-25 м (в зависимости от глубины) от положения якоря на дне со скоростью 0.1-0.3 м/с при скорости ветра $U_{10} = 9$ м/с.

На мачте вежи располагались 4 ультразвуковых датчика скорости WindSonic и MaxiMet производства Gill Instruments на высотах 0.75 м, 1.25 м, 2.2 м, 5,3 м. Пятый датчик (высота измерения 0,1 м) располагался на отдельной поплавке, соединенной с вежей и отслеживающей поверхность воды. Такая схема измерений позволяет исследовать профиль скорости ветра и интерполировать его на произвольные высоты, а также, используя градиентный метод, восстанавливать статистические параметры турбулентного пограничного слоя, такие как турбулентный поток импульса и коэффициент аэродинамического сопротивления водной поверхности. Кроме этого, она соответствует структуре воздушного потока вблизи взволнованной поверхности воды (см [62]).

Кроме этого, вежа оборудована датчиками температуры воздуха, температуры воды и антенной струнных волнографов, позволяющей восстанавливать пространственно-временные спектры волнения. Одновременное измерение характеристик волнения и ветра легло в основу адаптации модели WW3 к условиям водоемов. Была определена зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления водной поверхности C_D от скорости ветра, приведенной к стандартной метеорологической высоте 10 м – U_{10} . Полученные результаты были аппроксимированы простой аналитической зависимостью, и предложена параметризация:

$$C_D(U_{10}) = 0.0019U_{10}^{-1} + 0.0004 + 0.000067U_{10} \quad (8)$$

Нужно отметить, что в Горьковском водохранилище присутствует течение со скоростью $V \approx 0.1$ м/с. При этом измерения проводились в фиксированной точке при помощи заякоренной вежи Фруда, что может приводить к погрешности при измерении частоты волнения. Однако, оценки показывают, что для характерных длин волн $\lambda = 2-8$ м скорость дрейфового течения составляет 3-6% от фазовой скорости волны:

$$\frac{V}{c_p} = \frac{kV}{\omega} = V \sqrt{\frac{2\pi}{g\lambda}} \quad (9)$$

Таким образом, отличие наблюдаемой частоты волнения от частоты, соответствующей дисперсионному уравнению, не превышает 6% в случае слабого ветра вдоль основного течения водохранилища (направление около 0 или 180 градусов). Поскольку основной массив экспериментальных данных был получен при направлениях ветра в интервале от 225 до 315 градусов, то фактическое значение погрешности было меньше.

1.10. Заключение

В Первой главе была приведена история развития исследования и предсказания поверхностного волнения, описаны современные методы и подходы к прогнозу волновой обстановки, способы валидации моделей. Подробно описана модель WW3, которая была выбрана для дальнейшего исследования. Поставлена проблема корректного задания ветровой накачки, описаны существующие атмосферные модели и данные реанализа. Отмечена возможность объединения моделей, "coupling". Описаны проблемы, возникающие при создании прогнозов волнения на коротких разгонах, в их числе проблема верификации моделей ввиду малого количества натуральных измерений. Приведено описание серии натуральных экспериментов, послуживших основой для адаптации модели WW3 и ее последующей верификации.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ НА ОЗЕРНОЙ ЧАСТИ ГОРЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В РАМКАХ АДАПТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ WAVEWATCH III

2.1. Введение

Поверхностное волнение, механизмы его генерации и развития, его влияние на приводный слой атмосферы и диффузию примесей в океане, его роль в климатической системе Земли имеют ряд приложений, к числу которых относится и моделирование поверхностного волнения в рамках спектральных волновых моделей. На сегодняшний день моделирование волн на внутренних водоемах является актуальной задачей, которая может быть решена посредством адаптации спектральных моделей. Для прогнозирования волнения разработан ряд выше описанных численных моделей (WW3, WAM, SWAN), которые описывают эволюцию полного двумерного спектра волн под влиянием ветроволнового взаимодействия, диссипации, четырехволнового взаимодействия, а в случае мелкой воды некоторые из них учитывают также трение о дно, обусловленные глубиной обрушения, трехволновое взаимодействие.

Основная проблема численного моделирования волн при помощи WW3 на внутренних водоемах средних размеров связана с малыми разгонами, при которых 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 скорости трения ветра (или скорости ветра на высоте 10 м) к фазовой скорости волны [4]. Еще одной особенностью является более сильная нелинейность, вызванная большой крутизной волн. Таким образом, подстройка океанской волновой модели к условиям внутренних водоемов средних размеров должна быть осуществлена в два этапа: подстройка ветровой накачки и "интеграла столкновений". Диссипация из-за опрокидывания волн носит универсальный характер. В данной главе будут описаны предложенные способы учета описанных особенностей.

2.2. Моделирование волнения в рамках модели WAVEWATCH III

Программный комплекс модели WW3 основан на численном решении уравнения Хассельмана для спектральной плотности волнового действия $N(k, \theta; x, t)$ (1) [4], в котором в случае выполнения приближения глубокой воды учитываются нарастание волн под действием ветра, четырехволновое взаимодействие и диссипация за счет обрушения волн. На водоемах средних и малых размеров, для которых характерны короткие разгоны, влияние ветровой накачки становится существенным и нуждается в более точном описании.

В условиях развитого волнения показано, например, в работах Захарова [63], 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. 3 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_{nl}).

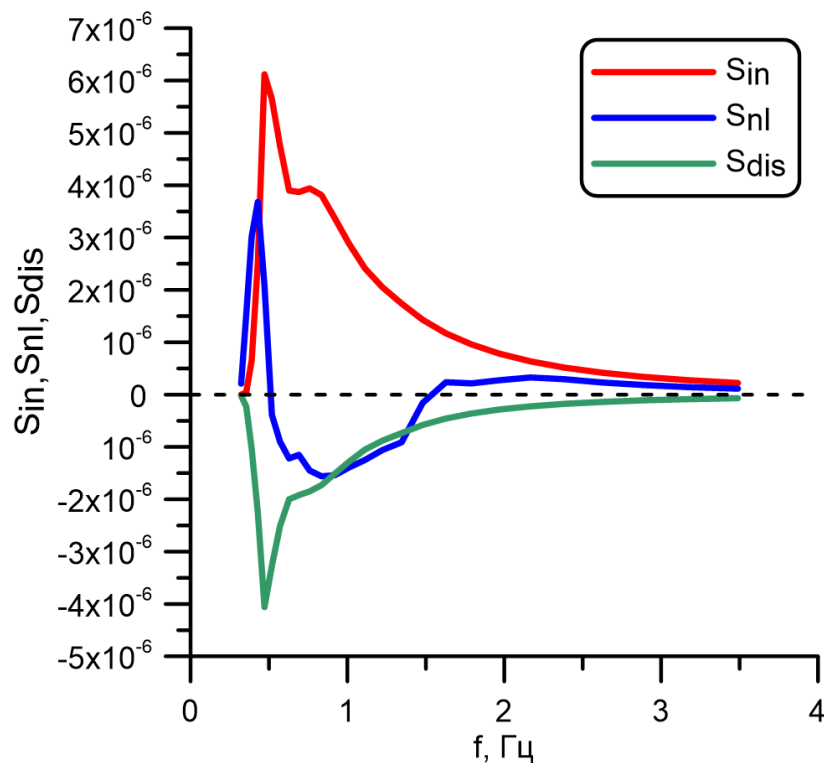


Рис. 3. Вклад от ветровой накачки S_{in} , четырехволновых нелинейных взаимодействий S_{nl} , диссипации S_{nl} в итоговый спектр.

В общем случае ветровая накачка S_{in} задается в соответствии с моделью Майлса нарастания волн под действием ветра [24]:

$$S_{in} = \beta N \sigma, \quad (10)$$

где β – безразмерный коэффициент, через который выражается скорость роста волн за счет ветровой накачки («wind wave growth rate» в [24]):

$$\text{Im } \sigma = \frac{1}{2} \sigma \frac{u_*^2}{c^2} \beta, \quad (11)$$

где c – фазовая скорость волны. Коэффициент β зависит от скорости трения ветра u_* , определяемой через турбулентный поток импульса:

$$\tau_{turb} = \rho_a \langle u'_x u'_z \rangle = \rho_a u_*^2, \quad (12)$$

где ρ_a – плотность воздуха, u'_x, u'_z – пульсационные компоненты скорости ветра.

Экспериментальное определение величины турбулентного потока импульса – сложная задача. Наиболее распространенными методами являются метод профилирования, пульсационный и диссипационный методы. В пульсационном методе поток импульса восстанавливается путём прямого измерения вихревых потоков (см, например, [64]). Диссипационный метод (см, например, [65]) заключается в анализе распределения спектральной плотности турбулентности в предположении, что существует баланс между генерацией и затуханием турбулентности. Метод профилирования использует логарифмический закон, основанный на теории пограничного слоя Прандтля и Кармана для плоской пластины: в условиях нейтральной стратификации в слое постоянных потоков (где турбулентный поток импульса не зависит от высоты) профиль скорости ветра близок к логарифмическому (см, например, [66]):

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}. \quad (13)$$

Здесь $\kappa = 0,4$ – постоянная Кармана, z_0 – высота шероховатости поверхности. По аналогии с сопротивлением плоской пластины вводят коэффициент аэродинамического сопротивления водной поверхности, который связывает измеряемую скорость ветра и турбулентный поток импульса (скорость трения ветра):

$$C_D = \frac{\tau_{turb}}{\rho_a U_{10}^2} = \frac{u_*^2}{U_{10}^2}, \quad (14)$$

где U_{10} – скорость ветра, приведенная к высоте 10 м.

Для описания коэффициента взаимодействия ветра и волн β существует ряд эмпирических моделей. Их поведение сильно отличается для длинных волн, типичных для океанических условий, но в диапазоне частот, характерном исследуемым условиям, они близки [63], поэтому вид параметризации коэффициента взаимодействия ветра и волн в условиях внутренних водоемов средних размеров не существен. Таким образом, для уточнения задания ветровой накачки мы должны получить параметризацию коэффициента C_D , который определяет переход от измеренной скорости U_{10} к входящей в параметризацию скорости трения ветра u_* .

Параметризации ветровой накачки и диссипации в версии WW3 v.3.14 [67] представлены моделями WAM 3, Tolman & Chalikov, WAM 4. Основное внимание в данном разделе уделено моделям ветровой накачки, параметры которых можно регулировать, опираясь на данные натурных измерений.

Из моделей, используемых в модели WW3, наиболее удобная с точки зрения модификации – параметризация Снайдера WAM 3 [68], [69].

Модель WAM 3 задается двумя эмпирическими формулами. Первая - для инкремента ветровой накачки:

$$S_{in}(k, \theta) = C_{in} \frac{\rho_a}{\rho_w} \max \left[0, \left(\frac{28u_*}{c_{ph}} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right) \right] \sigma N(k, \theta), \quad (15)$$

где C_{in} - постоянная, ρ_a/ρ_w – отношение плотностей воздуха и воды, θ_w – основное направление ветра, c_{ph} - фазовая скорость, σ - круговая частота, $N(k, \theta)$ – спектральная плотность волнового действия. Вторая – параметризация коэффициента аэродинамического сопротивления водной поверхности C_D , предложенная в [69]:

$$C_D = 0,001 \times (0,8 + 0,65U_{10}). \quad (16)$$

Эта параметризация обеспечивает связь между скоростью ветра на стандартной метеорологической высоте 10 м U_{10} и скоростью трения $u_* = U_{10} \sqrt{C_D}$.

Диссипация в WAM 3 [70] имеет следующий вид:

$$S_{dis}(k, \theta) = C_{dis} \hat{\sigma} \frac{k}{\hat{k}} \left(\frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}} \right)^2 N(k, \theta), \quad (17)$$

Здесь C_{dis} - постоянная ($C_{dis} = -2.36 \times 10^{-5}$), $\hat{\alpha} = Ek^2 g^{-2}$, $\hat{\alpha}_{PM}$ - значение $\hat{\alpha}$ для спектра Пирсона-Московица (PM) ($\hat{\alpha}_{PM} = 3.02 \times 10^{-3}$), \hat{k} определяется выражением

$\hat{k} = (1/\sqrt{k})^{-2}$, $\hat{\sigma} = (\bar{\sigma}^{-1})^{-1}$, $E = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} F(f, \theta) df d\theta$ - средняя энергия спектра, $F(f, \theta)$ - частотно-угловой спектр, f - частота, g - ускорение свободного падения.

Следующая возможная параметризация ветроволнового взаимодействия – модель Tolman & Chalikov [71]. В этой модели ветровая накачка задается формулой $S_{in}(k, \theta) = \beta_{in} \sigma N(k, \theta)$ Здесь β_{in} - безразмерный коэффициент, который аппроксимируется двенадцатью параметрами, являющимися функциями безразмерной частоты спектральных компонент и определяющимися коэффициентом C_D , который вычисляется итерационно в каждом временном окне численного счета.

Ветровая накачка в параметризации WAM 4 задается следующим образом [72]:

$$S_{in}(k, \theta) = \frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{\gamma_{max}}{\kappa^2} e^Z Z^4 \left(\frac{u_*}{c_p} + z_\alpha \right)^2 \cos^{p_{in}}(\theta - \theta_w) \sigma N(k, \theta) + S_{out}(k, \theta). \quad (18)$$

Здесь γ_{max} – безразмерный постоянный параметр роста, κ - постоянная вон Кармана, z_α - параметр подстройки возраста волнения, p_{in} – постоянная, контролирующая угловое распределение. $Z = \log(\mu)$, где параметр μ описан в статье [73]: в Z входят турбулентное давление τ_w и скорость трения u_* , подсчитываемые итерационно. $S_{out}(k, \theta)$ – слагаемое в форме [72], описывающее линейное затухание зыби.

Итак, в рассмотренных моделях ветровая накачка определяется параметром β и зависимостью $u_*(U_{10})$, определяемой коэффициентом C_D . Для уточнения счета модели WW3 на внутренних водоемах средних размеров было предложено использование полученной в результате данных натурных измерений параметризации коэффициента аэродинамического сопротивления $C_D(U_{10})$.

2.3. Конфигурация модели WW3

Поскольку обычно модель WW3 применяется для моделирования поверхностного волнения в морских условиях, была произведена адаптация модели к условиям внутреннего водоема. Для этого в открытом программном коде было изменено значение минимальной значительной высоты волнения (H_S) в ряде блоков, где напрямую указывалось наименьшее значение H_S . Для описания водоема использовалась топографическая сетка Горьковского водохранилища размерностью 72×108 с шагом $0,00833^0$ (что соответствует примерно 800 м x 900 м для рассматриваемых широт), которая была взята из данных NOAA “Global Land One-kilometer Base Elevation (GLOBE)” (Рис. 4 а). Топографическая сетка Горьковского водохранилища показана на Рис. 4 б. Было рассмотрено приближение глубокой воды.

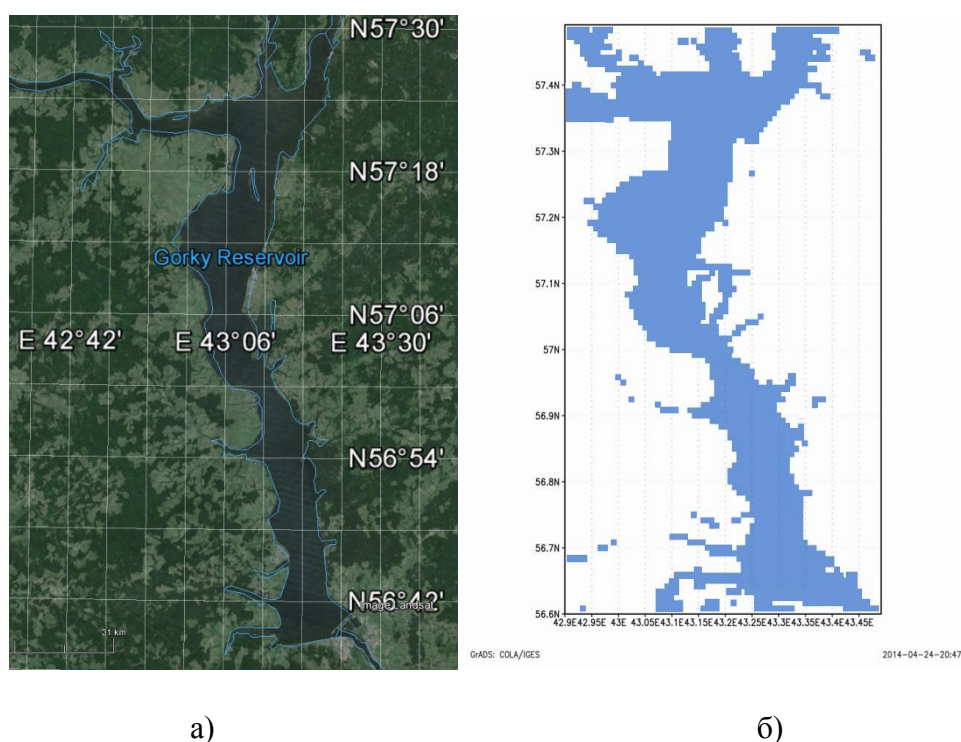


Рис. 4. а) Горьковское водохранилище, данные Google Earth; б) топографическая сетка Горьковского водохранилища.

Диапазон частот был изменен в соответствии с наблюдаемым в эксперименте диапазоном от 0,2 Гц до ≈ 4 Гц, который при моделировании дробился на 31 частоту и задавался логарифмической формулой для роста частоты $\sigma_N = (\delta)^{N-1} \sigma_1$, где инкремент был установлен в соответствии с рекомендациями $\delta = 1.1$ [4]; было рассмотрено 30 угловых направлений. На поверхности инициировалось начальное возмущение, которое развивалось под действием ветра. В практике для моделирования ветровых волн на

поверхности морей и океанов в качестве "форсинга" ветром обычно используют данные реанализа. На акваториях внутренних водоемов средних размеров этот подход неприменим из-за слишком низкого пространственного разрешения ($0.205^{\circ} \div 2,5^{\circ}$). Кроме того, в рассматриваемой области находятся только 2 метеостанции (Волжская ГМО, Юрьевец), но они находятся на побережье, при этом было установлено, что значения скорости ветра на берегу в значительной мере отличаются от таковых над акваторией водоема. В связи с этим величина и направление ветра брались из данных натурального эксперимента и считались однородными над всей акваторией водохранилища. Но необходимо отметить, что вынужденное задание ветра над водоемом однородным может являться источником ошибок в численном эксперименте, поскольку вытянутая форма водоема, высокие берега, могут приводить к заметной пространственной изменчивости с масштабами порядка или менее 1 км. Поэтому способ задания неоднородного распределения ветра над акваторией будет описан в Главе 4. Таким образом, запуск модели WW3 выполняется модулем `ww3_grid` с данными батиметрии GLOBE (разрешение $0,00833^{\circ}$), `ww3_strt` - с идеализированными начальными условиями, `ww3_shel` - для моделирования волнения под действием однородного изменяющегося во времени ветра, измеренного в эксперименте. Расчеты проводились в на кластере IAP RAS с подключением опции параллельного счета MPI. Модуль `ww3_oumf` использовался для получения выходных параметров поверхностных волн в широко применяемом в метеорологии формате NetCDF.

Поскольку для ветра над водохранилищем характерна сильная изменчивость, то усреднение скорости ветра в эксперименте производилось на интервале 15 минут. Таким образом, счет проводился с обновляющимися каждые 15 минут входными данными, измеренными в натурном эксперименте: модуль и направление ветра на высоте 10 м, разность температур вода-воздух. Сравнение производилось для следующих выходных данных: одномерные спектры возвышений, значительные высоты волн, средний период волнения. Все данные были получены в точке, соответствующей точке наблюдений, и были усреднены в промежутке 15 минут для соответствия аналогично усредненным данным натурального эксперимента.

2.4. Адаптация ветровой накачки WAVEWATCH III

Было проведено сравнение используемых параметризаций ветровой накачки. Для этого в ходе моделирования выводились коэффициенты, определяющие параметризации: C_D и β , используемые на каждом шаге численного счета. На Рис. 5 а представлены полученные зависимости $\beta(\sigma u_* / g)$ для трех параметризаций, а также их теоретические оценки для моделей WAM 3 и WAM 4. На Рис. 5 б показаны модельные зависимости $C_D(U_{10})$, а также предложенная по результатам натурных измерений параметризация $C_D(U_{10})$. Видно, что различные параметризации β и C_D , используемые в WW3 v. 3.14 дают близкие значения в условиях внутренних водоемов средних размеров ($\sigma u_* / g = 0.1 \div 0.15$, $U_{10} = 1 \div 10$ m/s). При этом предложенная нами параметризация C_D дает значительно более низкие значения при скоростях ветра $U_{10} > 4$ m/s.

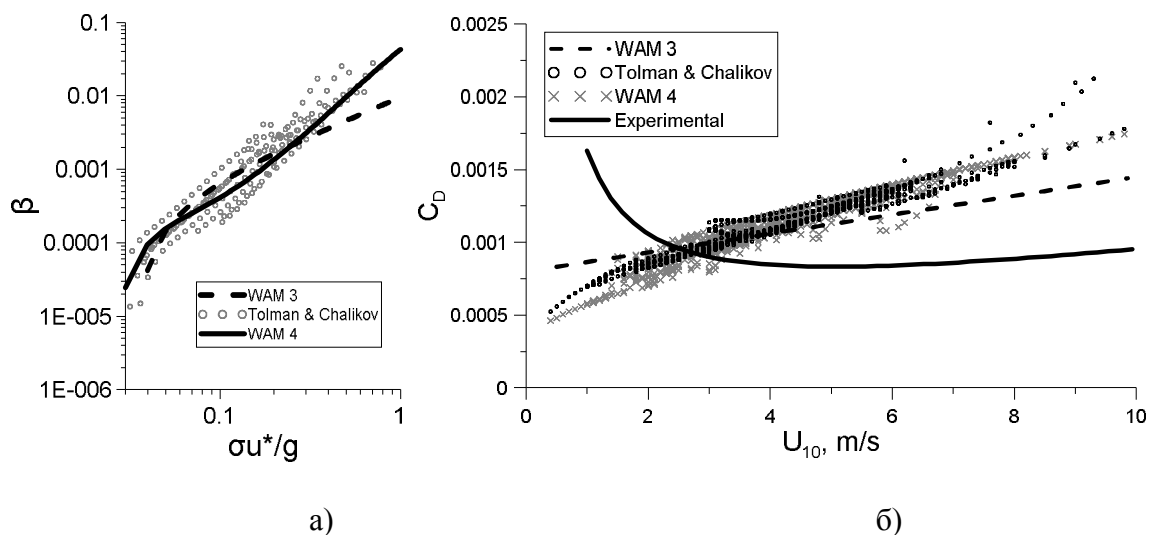


Рис. 5 а) Зависимости коэффициента взаимодействия ветра и волн от безразмерной скорости трения ветра для параметризации. б) зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления поверхности C_D от скорости ветра U_{10} . WAM 3 обозначено штриховой линией, Tolman & Chalikov - кругами, WAM4 – крестиками.

Был произведен расчет ветрового волнения для встроенных параметризаций WAM 3, Tolman & Chalikov и WAM 4. Также в адаптированной модели WW3 мы использовали уточненное задание ветровой накачки, состоявшее в использовании предложенной экспериментальной параметризации C_D в рамках параметризаций WAM 3 и Tolman & Chalikov. Как было показано, параметризация WAM 3 построена на явно заданной формуле, а Tolman & Chalikov – на неявно заданной формуле $C_D(U_{10})$. Эти формулы были напрямую изменены в коде программы. Таким образом, в качестве

параметризации C_D в модель была подставлена полученная в натурном эксперименте зависимость (8). На Рис. 6 а, б представлены характерные результаты моделирования и натуральных измерений, полученные для дней 13.06.13 и 20.06.14. На нижних графиках показаны измеренные значения ветра, используемые в моделировании, на верхних – изменение в течение дня восстановленных значений H_S , полученных как из натурального, так и из численного экспериментов. Как в модели, так и в эксперименте расчет H_S производился по формуле (4). Как видно из Рис. 6, значения значительной высоты волнения при счете в рамках встроенных параметризаций завышены. Видно, что использование предложенной параметризации $C_D(U_{10})$ улучшает соответствие экспериментом. На зависимостях $H_S(t)$ (Рис. 6) видно, что в начале временного интервала (первые 50 минут) расчетное волнение только устанавливается, тогда как экспериментальное значение уже лежит значительно выше. Данное отличие между расчётным и экспериментальными значениями мы связываем с неточностью задания ветра: в силу того, что ветер задавался однородным, волнение, приходившее из других частей водохранилища, было недостаточно велико. Для лучшего соответствия результатов требуется задание неоднородного поля ветра.

На Рис. 7 приведены сравнения спектров волн в точке измерений в фиксированный момент времени со спектрами, полученными из численного эксперимента для встроенных параметризаций WAM 3, Tolman & Chalikov и WAM 4 и для параметризаций WAM 3, Tolman & Chalikov с заданием новой зависимости $C_D(U_{10})$ по формуле (8). Было типичным улучшение предсказания спектров волнения (Рис. 7 а) при использовании новой параметризации $C_D(U_{10})$. Спектры в начале временного интервала, соответствующего ситуации на Рис. 6, где экспериментальные значения H_S превышали расчетные, показаны на Рис. 7 б. Однако наряду с улучшением предсказания волнения характерной была ситуация, в которой наблюдалось завышение H_S расчетными значениями по сравнению с экспериментальными, что отражено в спектрах на Рис. 7 в.

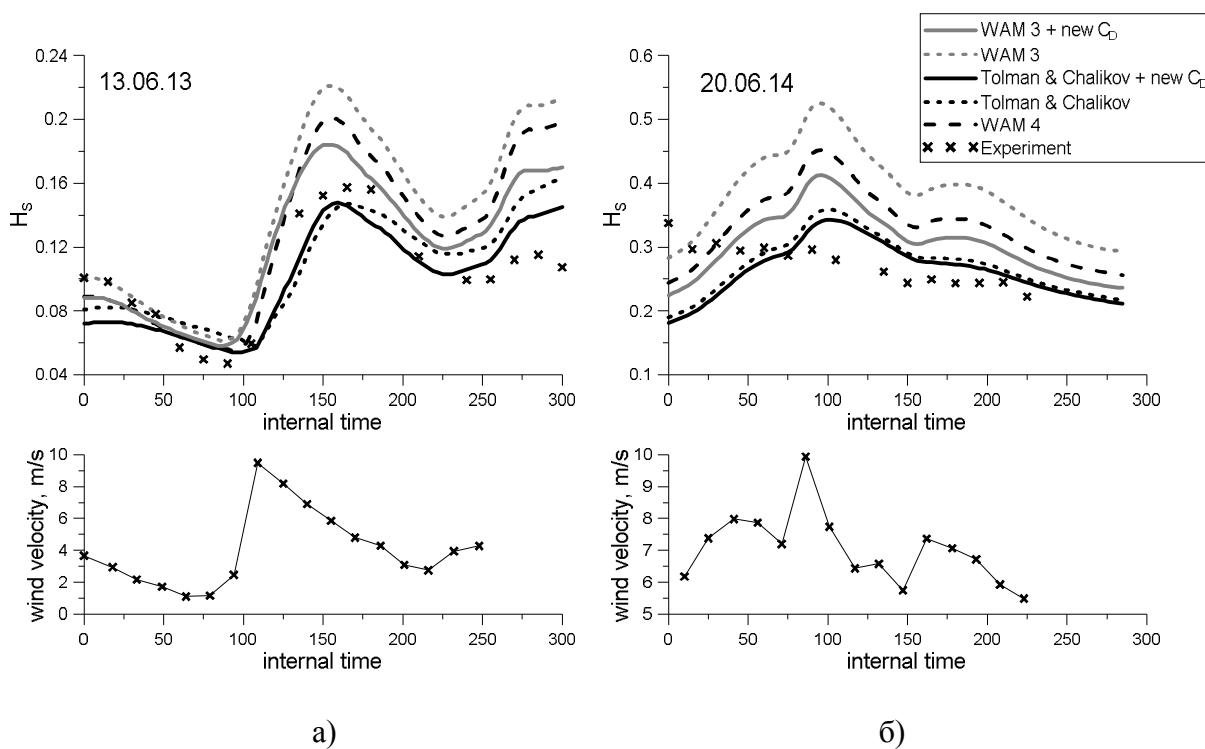


Рис. 6. Верхний график: зависимость H_s от времени. Результаты натурального эксперимента обозначены крестиками, расчетные значения H_s для параметризации WAM 3 (прерывистая линия темно-серого цвета), WAM 3 с новым C_D (сплошная линия темно-серого цвета), Tolman & Chalikov (прерывистая линия черного цвета), Tolman & Chalikov с новым C_D (сплошная линия черного цвета), WAM4 (линия в длинный пунктир). Нижний график: эволюция ветра с течение времени из данных натурального эксперимента, задаваемая в качестве входных данных в модель WW3 для а) 13.06.13, б) 20.06.14.

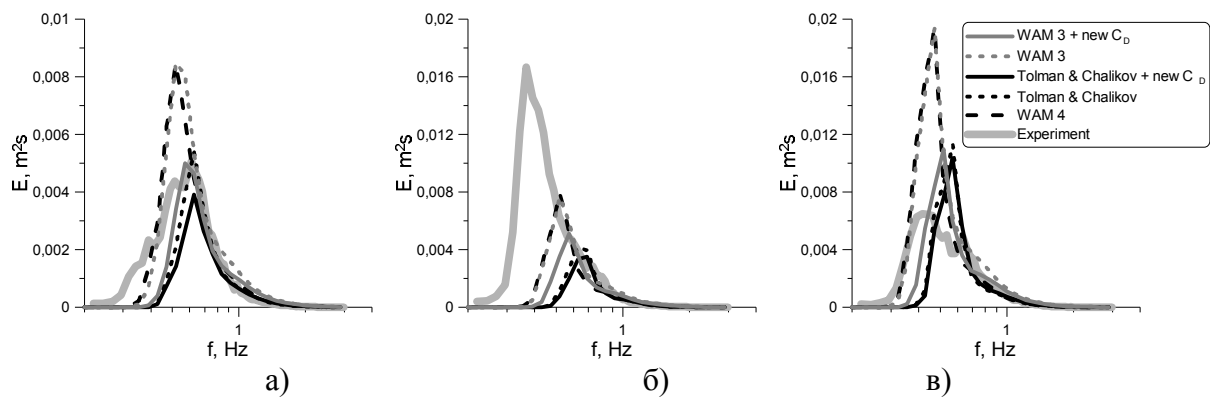


Рис. 7. Одномерные спектры волнения. Экспериментальный спектр обозначен жирной сплошной линией светло-серого цвета, расчетный спектр с подключением параметризации WAM 3 – прерывистой линией темно-серого цвета, WAM 3 с новым C_D – сплошной линией темно-серого цвета, Tolman & Chalikov – прерывистой линией темно-серого цвета, Tolman & Chalikov с новым C_D – сплошной линией темно-серого цвета, WAM4 – линией в длинный пунктир. а) типичная ситуация улучшения предсказания спектров волнения при задании новой параметризации C_D ; б) спектры, характерные началу временного интервала, наблюдается завышение экспериментального значения спектра над расчетным; в) частая ситуация, в которой наблюдается завышение расчетного значения спектров волнения над экспериментальным.

Для всех проведенных экспериментов было проведено сравнение интегральных характеристик – H_s и среднего периода T_m . Средний период T_m вычислялся по формуле (5). На графиках (Рис. 8) по оси абсцисс отложены значения, полученные в натурном эксперименте, по оси ординат – результаты численного моделирования. На Рис. 8 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:

$$std = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(M_i - O_i)^2}{O_i^2}} \quad (19)$$

Среднеквадратичное отклонение расчетных H_S для WAM3 составляет 52 %, для Tolman & Chalikov – 40%, для WAM4 – 46%. Использование новой параметризации C_D уменьшает среднеквадратичное отклонение H_S для WAM3 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.

Однако из нижних графиков на Рис. 8 видно, что предсказание средних периодов волнения имеет значительную погрешность, и уточнение задания инкремента накачки не внесло существенных изменений. Возможно, это связано с тем, что модель WW3 адаптирована к морским условиям, что выражается не только в функции накачки, но и в особенностях параметрического учета нелинейности, которая ответственна за перераспределение полученной энергии по спектру. В модели рассматриваются волны, характерные для морских и океанических условий, которые имеют меньшую крутизну по сравнению с волнами на внутреннем водоеме средних размеров. Коэффициенты пропорциональности в схеме DIA [74, 75] 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 быстрому сдвигу частот в низкочастотную область (downshift). Соответственно и средние периоды волн должны быть меньшими. Такая подстройка схемы нелинейности не должна повлиять на качество предсказания H_S , отвечающего за количество энергии, поступившей в систему, но должна привести к уточнению предсказания средних периодов волнения.

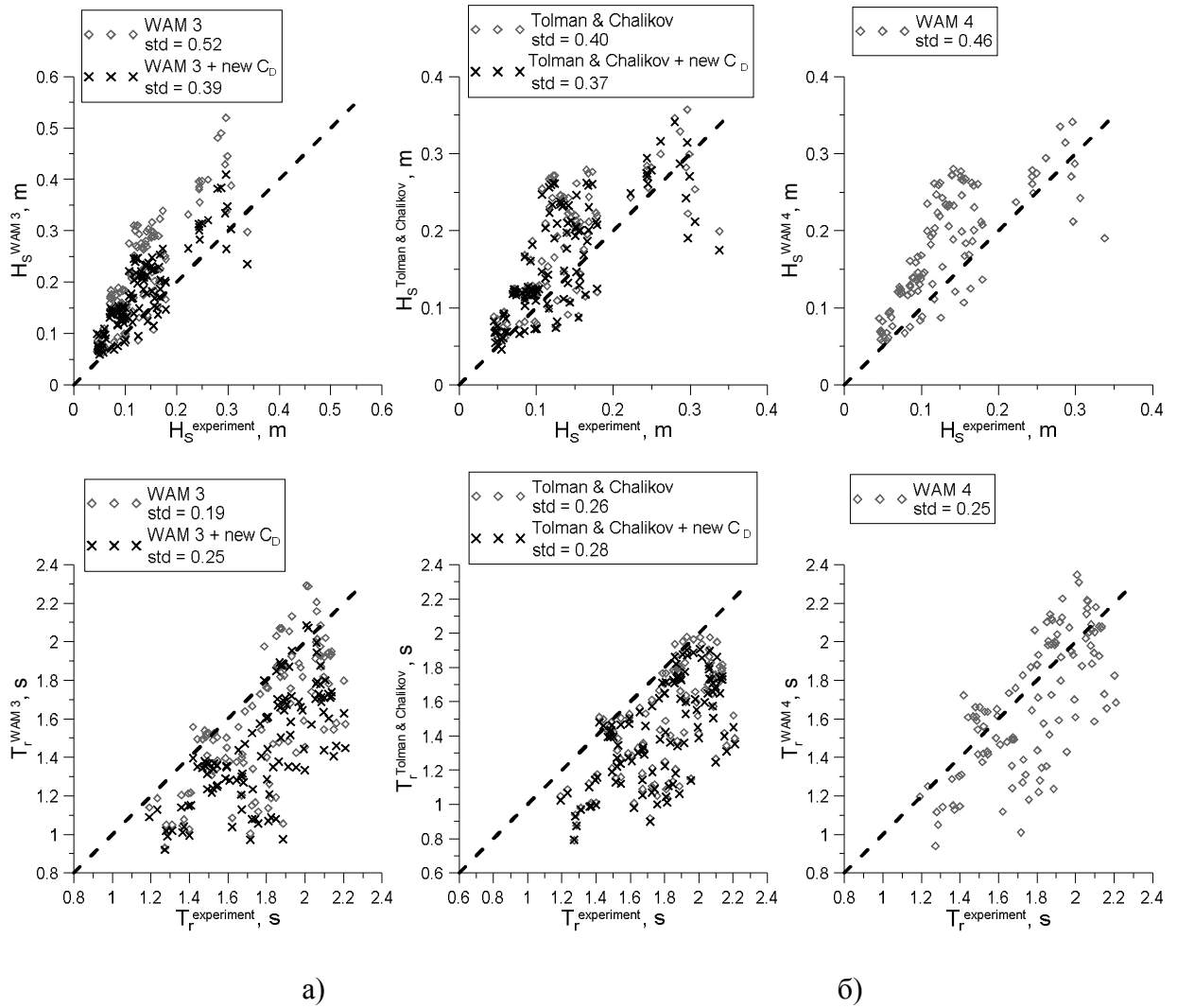


Рис. 8. H_S (верхние графики) и T_m (нижние графики) в сравнении с данными натурального эксперимента для а) параметризации WAM 3 (ромбики) и WAM 3 с новым C_D (крестики), б) параметризации Tolman & Chalikov (ромбики) и Tolman & Chalikov с новым C_D (крестики), в) параметризации WAM4 (ромбики).

2. 5. Подстройка параметризации нелинейности модели WAVEWATCH III

Таким образом, применение новой параметризации $C_D(U_{10})$ повлияло на скорость роста волн за счет ветровой накачки, что позволило улучшить согласие данных H_S натурального эксперимента и численного моделирования. В то же время, модель занижает значения среднего периода волнения T_r по сравнению с данными измерений, иными словами, это можно интерпретировать как то, что модель предсказывает более слабый эффект уменьшения частоты пика в спектре волнения по мере его развития (эффект дауншифтинга) по сравнению с наблюдаемым. Это можно объяснить тем, что в условиях внутреннего водоема наблюдаются более крутые волны ("озерный вал"), характеризующиеся более высокой степенью нелинейности, чем та, которая заложена в модели, настроенной на моделирование менее крутых волн, типичных для условий открытого океана. То есть модель предсказывает слишком медленную передачу энергии по спектру волнения, за которую, как известно [15], отвечают четырехволновые нелинейные взаимодействия.

Нелинейное четырехволновое взаимодействие играет важную роль в эволюции ветровых волн. Первое описание переноса энергии при четырехволновом взаимодействии было сделано Филиппсом [76]. Далее в работах Хассельманна [25] и Захарова [77] эта теория была распространена на море со случайной поверхностью. Было показано, что четыре гармоники, удовлетворяющие резонансным условиям вида:

$$\begin{cases} \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4 \\ \omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4 \end{cases} \quad (20)$$

могут обмениваться энергией. Обмен энергией описывается шестимерным интегралом, известным как интеграл Больцмана:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = \iiint G(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4) \times \delta(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_4) \times \delta(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4) \times \\ \times [N_1 N_3 (N_4 - N_2) + (N_3 - N_1) N_2 N_4] d\mathbf{k}_2 d\mathbf{k}_3 d\mathbf{k}_4 \quad (21)$$

Здесь N_i - плотность волнового действия гармонической волны с волновым вектором \mathbf{k}_i при резонансном взаимодействии с тремя другими гармоническими волнами с волновыми векторами $\mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4$. Дельта-функции показывают, что вклад в интеграл (21) вносят только гармонические волны, удовлетворяющие (20), при этом они обеспечивают сохранение волновой энергии, волнового действия и импульса [2]. Угловые частоты ω_i связаны с k_i дисперсионным соотношением

$$\omega^2 = gk \quad (22)$$

G - коэффициент нелинейного взаимодействия, полученный для случая волн на поверхности слоя жидкости бесконечной глубины в работе Хассельмана [25].

В модели WW3 точное интегральное выражение, входящее в (21), не используется из-за того, что для его вычисления требуются численные ресурсы, недоступные при проведении оперативных прогнозов. Вместо этого используются его упрощенные экономичные модели, при этом в версии WW3 v.5.16 для параметризации четырехволнового нелинейного взаимодействия могут быть использованы четыре различных варианта моделей (source of nonlinear interaction, SNL) SNL1-4 [78]. Широко используемая в мировом научном сообществе параметризация SNL1 – это аппроксимация Хассельмана Discrete Interaction Approximation (DIA) [74, 75]. Она представляет собой выражение, заменяющее прямой расчет интеграла Больцмана на основе предположения о взаимодействии лишь пары гармонических волн с "зеркальной" парой векторов. При этом резонансные условия (20) для этих векторов записываются следующим образом:

$$\begin{cases} \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4 \\ \omega_1 = \omega_2 \\ \omega_3 = (1 + \lambda)\omega_1 \\ \omega_4 = (1 - \lambda)\omega_1 \end{cases} \quad (23)$$

Характерная пара взаимодействующих векторов и их "зеркальная" пара изображены на Рис.9.

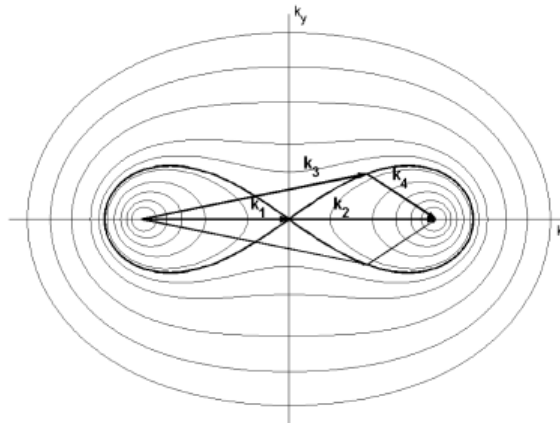


Рис.9. Конфигурация волновых векторов и их "зеркальная" пара для классических параметров параметризации четырехволновых нелинейных взаимодействий DIA («восьмерка» Филлипса в \mathbf{k} -плоскости).

Вклад нелинейного слагаемого для соответствующих векторов при этом выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \delta SNL_{1,2} \\ \delta SNL_3 \\ \delta SNL_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} C_{nl} g^{-4} f^{11} \left(E_{1,2}^2 \left(\frac{E_3}{(1+\lambda)^4} + \frac{E_4}{(1-\lambda)^4} \right) - 2E_{1,2} \frac{E_3 E_4}{(1-\lambda^2)^4} \right) \quad (24)$$

Здесь E_i - это плотности энергий взаимодействующих гармоник, g - гравитационная постоянная. $C_{nl} = 2.78 \cdot 10^7$, $\lambda = 0.25$ – «классические» параметры модели DIA,

предложенные в работе [75], где выбор значения данных параметров был осуществлен на основе сравнения с данными натурных измерений параметров волнения в открытом океане. Параметр λ_{nl} определяет различие частот взаимодействующих гармоник, и параметр пропорциональности C_{nl} отражает вклад нелинейных четырехволновых взаимодействий в итоговый спектр. Эти параметры можно изменять, и, таким образом, управлять схемой DIA. Например, в [79] предлагается использовать другие комбинации этих параметров для условий морей и океанов. При этом можно ожидать, что для условий внутренних водоемов должна быть подобрана другая комбинация параметров.

Существуют также другие методы аппроксимации нелинейных четырехволновых взаимодействий, представленные в модели WW3. Среди них модель SNL2 (Exact-NL model), представляющая собой прямое вычисление интеграла нелинейных столкновений, осуществленное в работах [80-82], основанное на подходе WRT (Webb-Resio-Tracy method). Модель SNL3 (Generalized Multiple DIA) [83] представляет собой "расширение" классической версии DIA, где изменен вид параметризованных резонансных условий, и использовано большее количество взаимодействующих пар векторов. Еще один метод вычисления нелинейных взаимодействий, SNL4 (The Two-Scale Approximation (TSA) and the Full Boltzmann Integral (FBI)), был предложен в [84, 85].

Все методы расчета нелинейных взаимодействий были применены в рамках адаптированной к условиям внутреннего водоема модели WW3 на акватории Горьковского водохранилища, удобного с точки зрения наличия большого объема накопленных авторами данных натурных измерений для верификации расчетов. Моделирование проводилось в условиях адаптированной к условиям внутренних водоемов средних размеров модели WW3. Конфигурация модели при исследовании параметризаций нелинейных взаимодействий несколько отличалась от описанной выше. В первую очередь, для описания подстилающей поверхности была использована более подробная топографическая сетка данных: осуществлено извлечение географических данных GMTED2010 формата GEOTIFF с разрешением 250 м (Рис. 10). Диапазон частот при моделировании дробился на 56 частот и задавался логарифмической формулой для роста частоты $\sigma_N = (\delta)^{N-1} \sigma_1$, где инкремент был установлен $\delta=1.05$; было рассмотрено 55 угловых направлений. Сравнение производилось для следующих выходных данных: одномерные спектры возвышений, значительные высоты волн, средний период волнения.

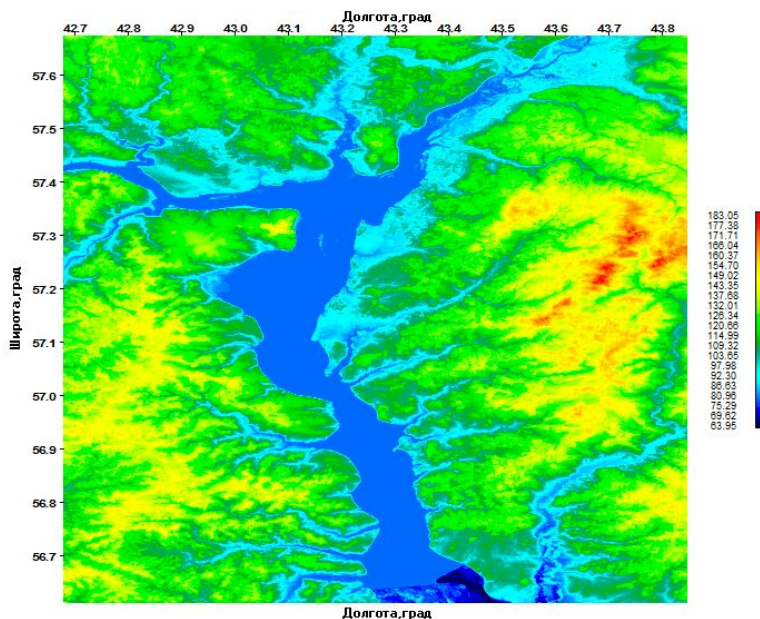


Рис. 10. Карта Горьковского водохранилища (данные GMTED2010).

Было исследовано влияние представленных в WW3 v.5.16 параметризаций четырехволнового взаимодействия (SNL1 (DIA), SNL2, SNL3, SNL4) на предсказание средних параметров волнения в Горьковском водохранилище. На Рис. 11 показаны результаты расчетов интегральных параметров волнения с помощью параметризаций, встроенных в WW3 v.5.16 для тестового дня 14.07.2017, сопоставленные с данными измерений. Расчеты были проведены при использовании ветровой накачки WAM 3, которая была адаптирована к условиям коротких разгонов внутреннего водоема за счет изменения коэффициента аэродинамического сопротивления C_D (описано в п.2.4).

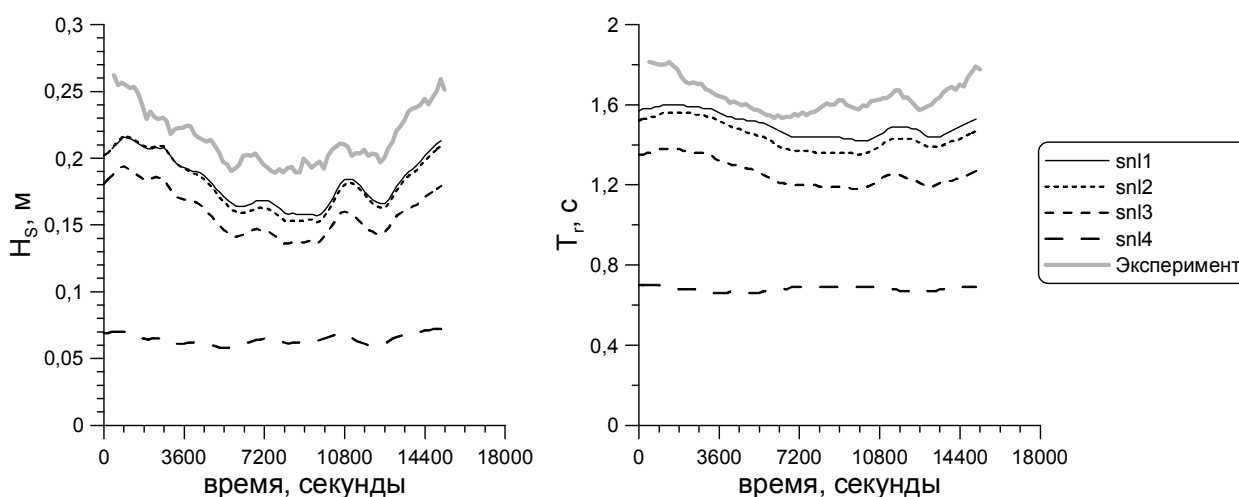


Рис. 11. Сравнение расчета модели WW3 при подключении встроенных в модель параметризаций нелинейных четырехволновых взаимодействий SNL1 – 4 и данных натурального эксперимента для тестового дня 14.07.2017.

Сравнение показывает существенное отклонение значительных высот и периодов волнения при использовании как приближенных параметризованных методов расчета (SNL1, SNL3), так и прямых численных методов расчета интеграла Больцмана (SNL2, SNL4) от экспериментальных данных (см. Таблицу 2).

	SNL1	SNL2	SNL3	SNL4
H_s	17%	19%	31%	128%
T_r	10%	14%	27%	91%

Таблица 2. Таблица средних стандартных отклонений расчетов модели WW3 с подключением всех встроенных в модель параметризаций нелинейных четырехволновых взаимодействий SNL1 – 4 для тестового дня 14.07.2017.

Представленные параметризации нелинейного четырехволнового взаимодействия, как и ветровой накачки, подстроены под условия морей и океанов. Как было показано в разделе 2.4, новая параметризация ветровой накачки позволила улучшить предсказание значительной высоты волн, т.е. их энергии. Для усовершенствования предсказания перераспределения энергии волн по спектру было предложено произвести подстройку параметров схемы нелинейности к условиям внутренних водоемов средних размеров.

Дальнейший анализ и подстройка схемы нелинейности был произведен на базе модели нелинейности DIA (SNL1). Схема DIA широко используется для нужд оперативного моделирования, кроме того, она удобна с точки зрения модификации, поскольку в нее входят только два параметра (λ_{nl} , C). Для того, чтобы оценить чувствительность модели к изменению параметров нелинейности, были проведены расчеты WW3 (с подключением ветровой накачки WAM3 и предложенным коэффициентом аэродинамического сопротивления C_D) при подключении модели DIA при нескольких наборах параметров: дефолтные (0,25, $2.78 * 10^7$), с изменением λ_{nl} ((0,1, $2.78 * 10^7$), (0,4, $2.78 * 10^7$)) и с изменением C ((0,25, $2.78 * 10^6$), (0,25, $3 * 10^8$)). На Рис. 12 показано влияние варьирования этих параметров на значение значительных высот и периодов волн. При возрастании параметра λ_{nl} в 4 раза от $\lambda_{nl}=0.1$ до $\lambda_{nl}=0.4$ наблюдалось изменение периодов и значительных высот волн примерно в 2 раза. При изменении параметра C на 2 порядка периоды изменялись примерно в 1,5 раза, а значительные высоты волн изменялись незначительно.

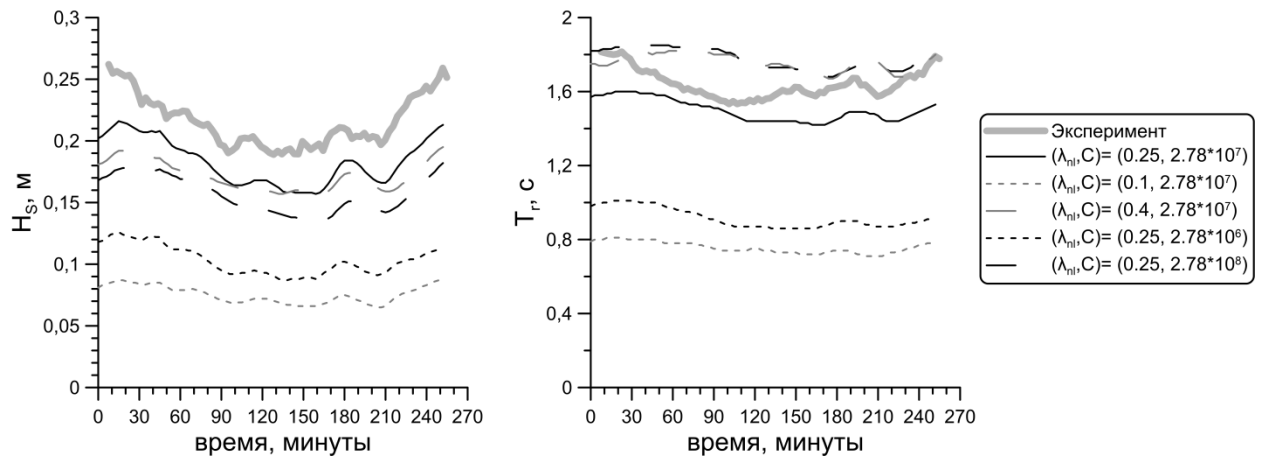


Рис. 12. Чувствительность расчета средних параметров волнения в модели WW3 при изменении параметров схемы DIA для тестового дня 14.07.2017.

Таким образом, было предложено подстроить схему нелинейности DIA за счет подбора "оптимальных" параметров, которые обеспечат наилучшее соответствие между расчетным и экспериментальным значениями значительных высот и периодов волн. Для поиска "оптимальных" параметров схемы нелинейности DIA λ_{nl} и C было проведено моделирование для двух параметризаций ветровой накачки: WAM 3 (ST1) и BYDRZ (ST6) [86-88]. Обе параметризации были использованы с предложенным выше измененным заданием коэффициента аэродинамического сопротивления C_D . Была составлена программа оптимизации параметров (λ_{nl}, C) , минимизирующая отклонения предсказания модели от данных натурных измерений. При оптимизации был использован массив данных натурных измерений за 2016 и 2017 года, общая продолжительность временного ряда составила 47 часов в интервале скоростей ветра $U_{10}=0.5\div 12.5$ м/с, параметров волн $H_s=0.05\div 0.45$ м, $T_r=0.5\div 2.8$ с. В результате было получено распределение среднеквадратичного отклонения расчета модели DIA от экспериментальных данных. На Рис. 13 а показано распределение среднеквадратичного отклонения расчетного значения H_s от экспериментального, на Рис. 13 б - расчетного значения среднего периода T_r от экспериментального при использовании ветровой накачки WAM 3. Белым контуром выделена область с значениями среднеквадратичного отклонения, не превышающими 28% по значительным высотам волн. 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.

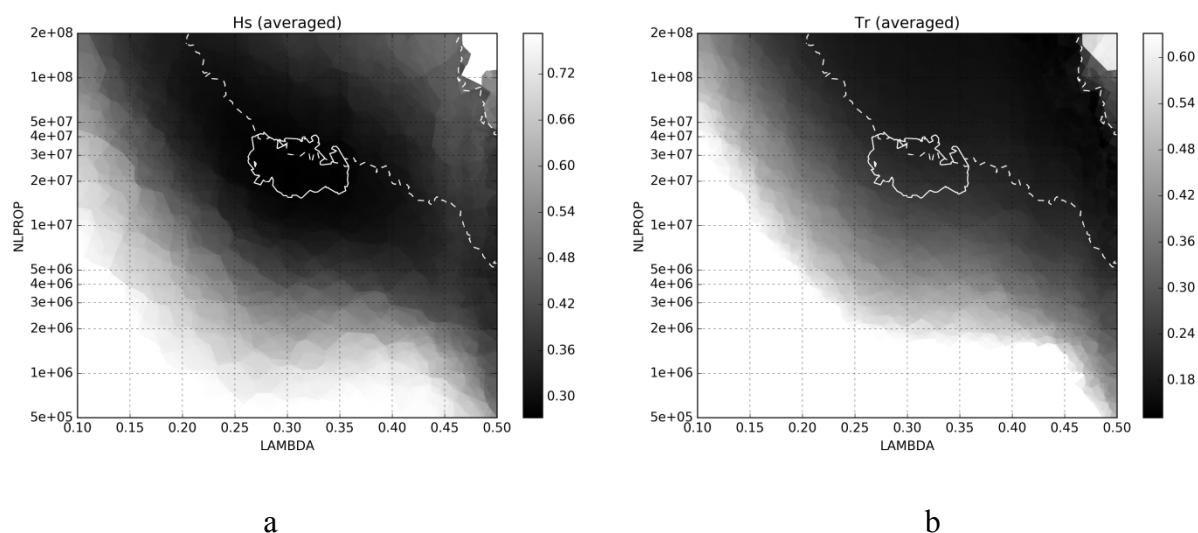


Рис. 13. Распределение среднеквадратичного отклонения расчета модели DIA от экспериментальных данных при подключении параметризации WAM 3 с измененным C_D для а) H_s , б) T_r .

Аналогичные расчеты при использовании другой параметризации ветровой накачки BYDRZ приведены на Рис. 14. В этом случае в выделенных областях значения среднеквадратичного отклонения не превышают 25% по периодам и 35% - по значительным высотам волн. Среднеквадратичное отклонение при использовании дефолтных параметров составляет 36% по значительным высотам волн и 28% по периодам.

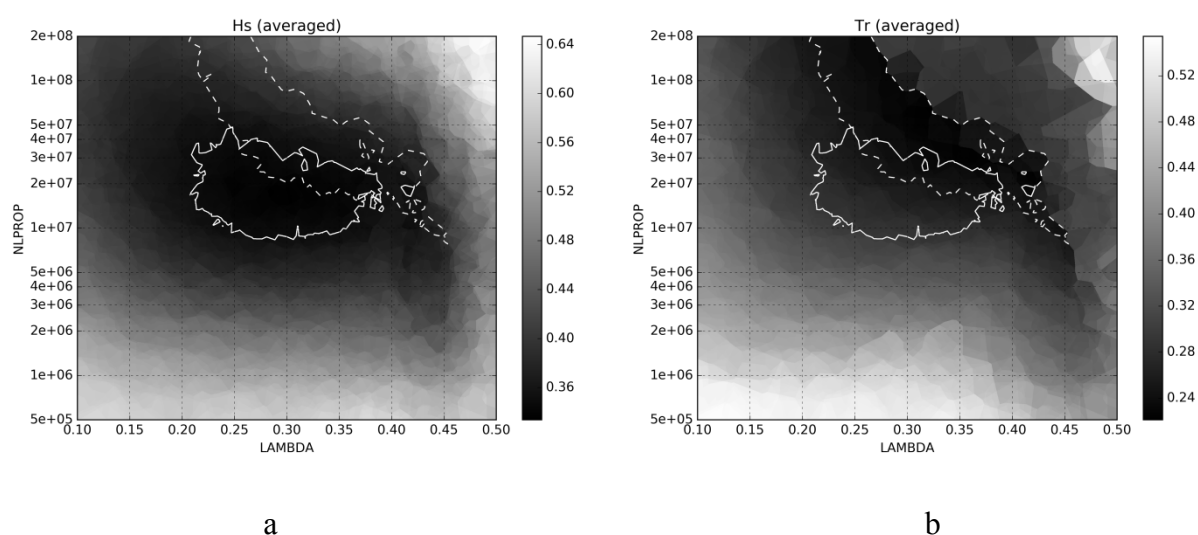


Рис. 14. Распределение среднеквадратичного отклонения расчета модели DIA от экспериментальных данных при подключении параметризации BYDRZ с измененным C_D для а) H_s , б) T_r .

В пересечении областей минимальных значений отклонения расчета от эксперимента были выбраны точки, отвечающие "оптимальному" набору параметров DIA. 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 модели BYDRZ $(\lambda_{nl}, C) = (0.275, 3 \cdot 10^7)$ вместо $(0.25, 3 \cdot 10^7)$. Выбор точки внутри пересечения областей в каждом случае основывался на принципе минимизации среднеквадратичного отклонения расчета средних периодов волн от эксперимента и неизменности или малой поправки расчета значительных высот волн. Изменение набора параметров слабо повлияло на пары векторов на "восьмерке Филлипса" (см Рис. 9), угол между волновыми векторами k_3 и k_1 изменился с 11.48° на 11.826° .

Влияние использования предложенных "оптимальных" параметров на расчет эволюции волнения для тестового дня 14.07.2017 при использовании измененной параметризации ветровой накачки WAM 3 представлено на Рис.15 a, b. Видно, что в среднем достигнуто улучшение предсказания средних периодов волнения: среднеквадратичное отклонение расчета от эксперимента изменилось с 10% на 4%. При этом для значительных высот волн отклонение изменилось с 17% на 15%.

Аналогичные расчеты при подключении измененной параметризации BYDRZ приведены на Рис.15 c, d. В данном случае среднеквадратичное отклонения снизилось с 9% до 6% по периодам, а изменение среднеквадратичного отклонения по значительным высотам волн было мало (меньше 1%).

Другие примеры Влияние использования предложенных "оптимальных" параметров на расчет эволюции волнения при использовании измененной параметризации ветровой накачки WAM 3 представлены на Рис. 16, 17 для тестовых дней 01.09.2016 и 23.07.2016 соответственно.

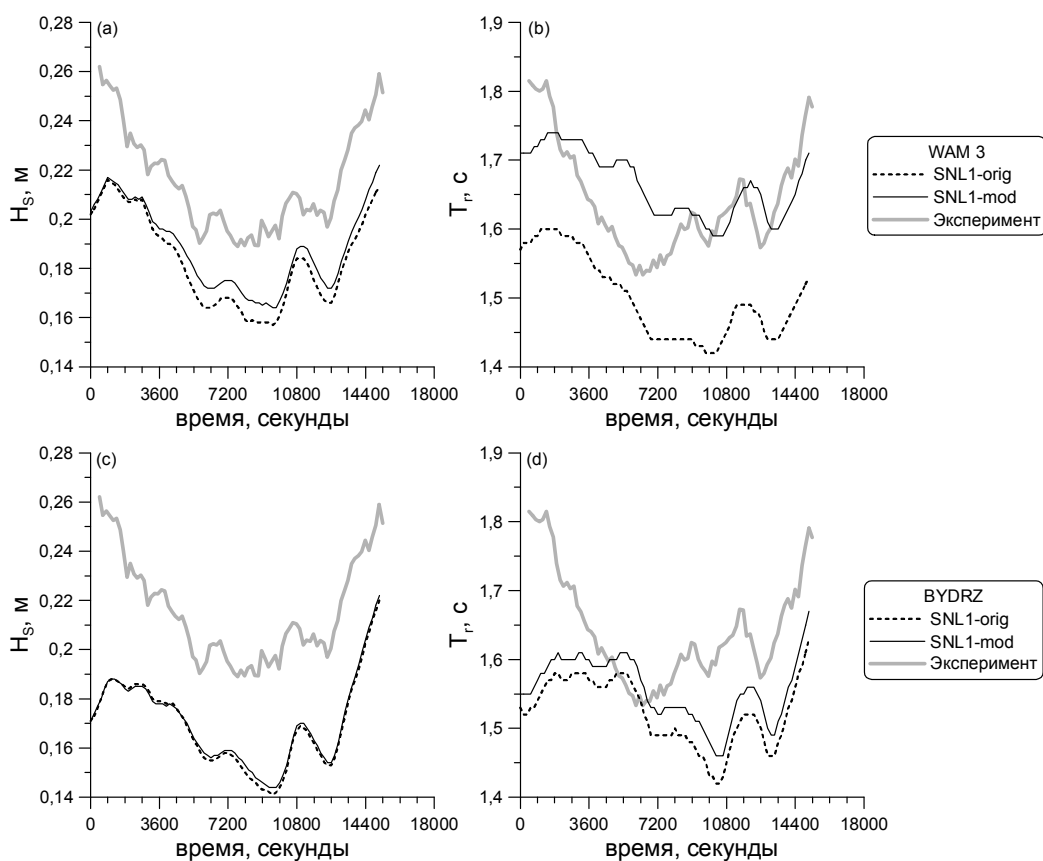


Рис.12. Экспериментальные и расчетные данные для оригинальной версии DIA и для DIA с предложенными "оптимальными" параметрами для тестового дня 14.07.2017: (a) значительные высоты волн и (b) средние периоды волнения при измененной ветровой нагрузке WAM 3, (c) значительные высоты волн и (d) средние периоды волнения при измененной ветровой нагрузке BYDRZ.

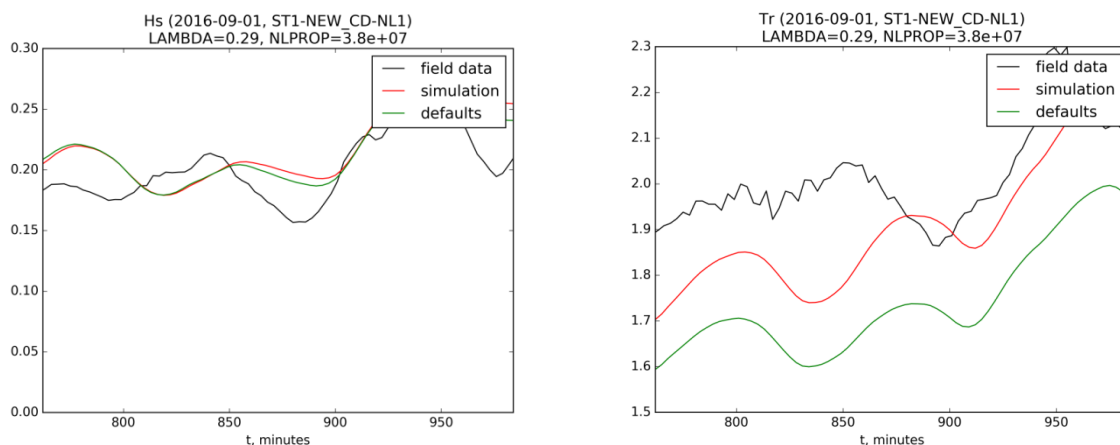


Рис.16. Экспериментальные и расчетные данные для оригинальной версии DIA и для DIA с предложенными "оптимальными" параметрами для тестового дня 01.09.2016: (a) значительные высоты волн и (b) средние периоды волн при измененной ветровой нагрузке WAM 3.

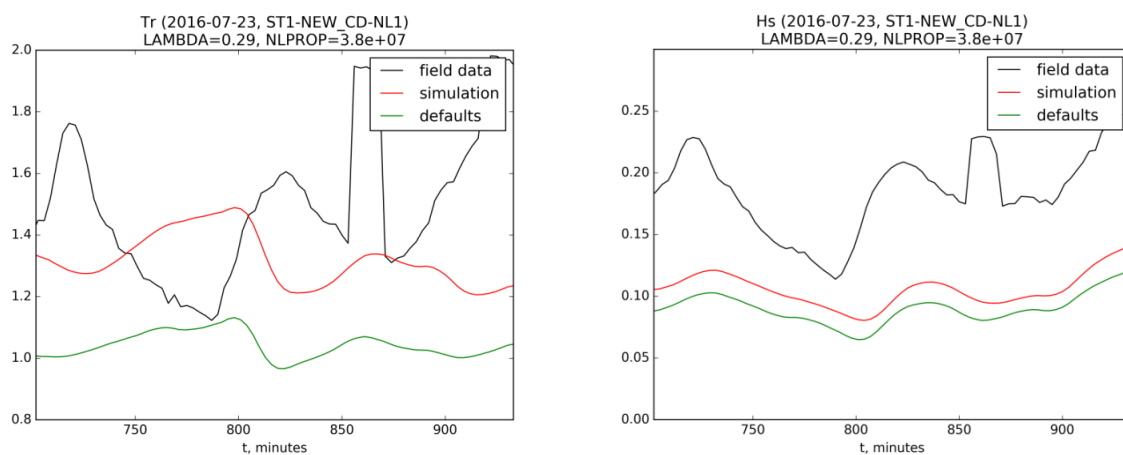


Рис.17. Экспериментальные и расчетные данные для оригинальной версии DIA и для DIA с предложенными "оптимальными" параметрами для тестового дня 23.07.2016: (a) значительные высоты волн и (b) средние периоды волн при измененной ветровой нагрузке WAM 3.

2. 6. Спектры волнения

Таким образом, для развития методов моделирования волнения на внутренних водоемах была проведена адаптация модели прогноза волнения WW3 к условиям коротких разгонов внутреннего водоема средних размеров (на примере Горьковского водохранилища), состоявшая в подстройке вклада ветровой накачки в результирующий спектр волнения за счет изменения параметризации аэродинамического сопротивления и в подстройке параметризации нелинейности, за счет оптимизации параметров. Для контроля устойчивости расчетов и сохранения формы двумерного спектра при вносимых изменениях было проведено сравнение угловых спектров при расчете с оригинальными параметризациями, при измененной параметризации ветровой накачки и при измененных одновременно ветровой накачке и параметризации нелинейности.

На Рис. 18 приведен пример угловых спектров $S(\omega, \vartheta)$ в полярных координатах (начало координат в центре рисунка), полученных в натурном эксперименте и в численном моделировании. На Рис. 18 б) показано сопоставление натуральных измерений (чёрные изолинии) и моделирования с оригинальной параметризацией. Видно хорошее соответствие пиков спектра. Распределение по углу для высоких частот в натурном эксперименте значительно шире, однако спектральные модели описывают только энергонесущую часть спектра волн. При этом необходимо отметить, что в численном моделировании определяются также волны, распространяющиеся против ветра, регистрация которых невозможна в натурном эксперименте в силу ограничения методики восстановления пространственного спектра. На Рис. 18 в) показаны результаты моделирования с использованием модифицированной параметризации в сравнении с оригинальной и натурными измерениями. Видно, 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, пропорционально изменяя мощность каждой гармоники.

На Рис. 19 приведено угловое распределение для основной частоты волн для натурального эксперимента и численного моделирования. Видно хорошее соответствие результатов моделирования натурному эксперименту, а также малое изменение модельных значений при смене параметризации.

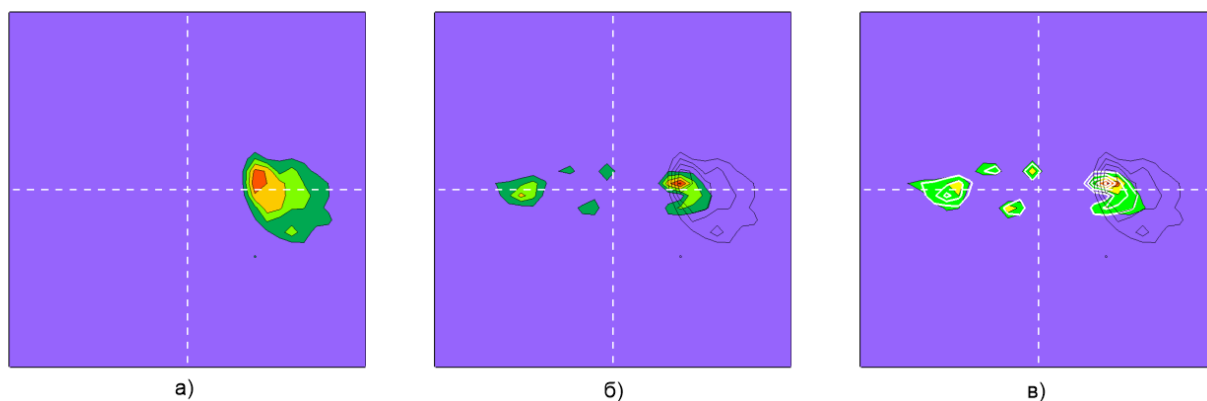


Рис. 18. Угловые спектры в полярных координатах. Расстояние от начала координат соответствует частоте ω , угол – направлению распространения ϑ , цветом и изолиниями – мощность. а) цветом – натурные измерения. б) цветом – оригинальная параметризация, чёрные изолинии – натурные измерения; в) цветом – модифицированная параметризация, белые изолинии – оригинальная параметризация, чёрные изолинии – натурные измерения.

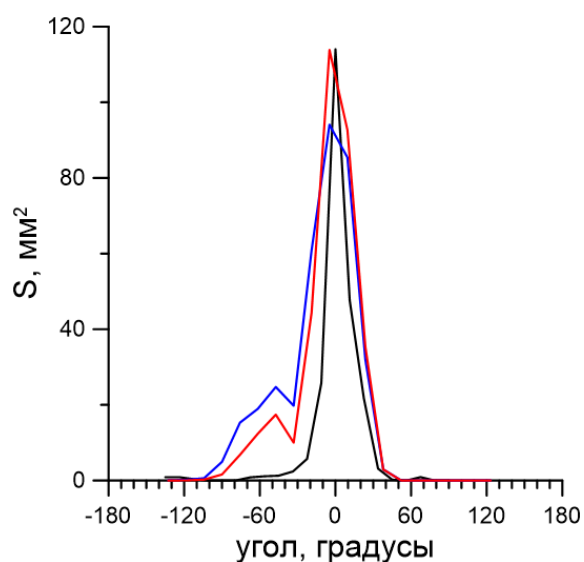


Рис. 14. Распределение спектральной плотности энергонесущих волн по углу относительно направления ветра. Синий – оригинальная параметризация, красный – модифицированная параметризация, чёрный – натурные измерения.

2.7. Заключение

Таким образом, в Главе 1 приведена адаптация модели WW3 к условиям коротких разгонов внутренних водоемов средних размеров на примере Горьковского водохранилища. При проведении вычислений были изменены встроенные значения параметров модели на основе данных натуральных измерений на водохранилище, в частности, минимальная высота значительных волн, рассмотрен диапазон частот от 0,2 Гц до ≈ 4 Гц. Волнение, развивающееся под действием однородного нестационарного ветра, задаваемого на основе данных из натурального эксперимента, было рассчитано с использованием как встроенных параметризаций ветровой накачки, адаптированных к условиям открытого океана, так и параметризаций с измененным заданием $C_D(U_{10})$, которое было получено в результате серии натуральных экспериментов. Натурные эксперименты на Горьковском водохранилище показали, что значение коэффициента аэродинамического сопротивления поверхности C_D в области умеренных и сильных ветров на $\approx 50\%$ ниже, чем значения, типичные для океанских условий. Результаты численного эксперимента сравнивались с результатами, полученными в натурном эксперименте на Горьковском водохранилище. Использование встроенной параметризации показало существенное завышение расчетных данных H_S по сравнению с экспериментальными, что мы объясняем существенным завышением турбулентных напряжений ветра (значений скорости трения u_*) и, соответственно, ветровой накачки. Использование новой параметризации $C_D(U_{10})$, полученной на основе измерений на водохранилище, снизило значения u_* , и, следовательно, ветрового инкремента поверхностных волн, что улучшило согласие в данных H_S натурального эксперимента и численного моделирования.

Однако сравнение расчетов в рамках океанских встроенных моделей ветровой накачки также дает заниженные значения для среднего периода волнения T_m . В то же время изменение ветровой накачки существенно не повлияло на согласие значений T_m по результатам численного моделирования и натурального эксперимента. Мы связываем это с тем, что схема нелинейности также подстроена под условия морей и океанов, и поэтому была проведена также адаптация параметризации нелинейности для случая коротких разгонов в модели прогноза волнения WW3.

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 было предложено произвести подстройку параметров схемы нелинейности на основе широко используемой параметризации DIA.

Была составлена программа, минимизирующая отклонения предсказания модели от данных натурных измерений. Были выбраны "оптимальные" параметры для двух 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 модели BYDRZ - $(0.275, 3 \cdot 10^7)$ вместо $(0.25, 3 \cdot 10^7)$. Для DIA с предложенными "оптимальными" параметрами наблюдалось улучшения воспроизведения периодов моделью WW3 по сравнению с оригинальной DIA.

На сегодняшний день расчеты адаптированной к условиям внутреннего водоема моделью WW3 проводятся на акватории Горьковского водохранилища, результаты публикуются на сайте [89].

ГЛАВА 3. АПРОБАЦИЯ АДАПТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ WAVEWATCH III В УСЛОВИЯХ КОРОТКИХ РАЗГОНОВ ДРУГИХ АКВАТОРИЙ

3.1. Введение

Нужно отметить, что для подтверждения универсальности предложенной в Главе 2 адаптации модели WW3 требуется провести расчеты в условиях коротких разгонов. Однако можно ожидать, что поведение модифицированной WW3 будет лучше соответствовать реальному волнению, чем WW3 с встроенными параметризациями, ориентированными на морские или океанские условия, что наблюдалось для условий исследуемого Горьковского водохранилища.

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.

3.2. Апробация адаптированной модели WAVEWATCH III в прибрежной зоне Финского залива

Предложенная адаптация модели WW3 была применена для расчета параметров волнения в Балтийском море в прибрежной зоне Финского залива.

Балтийское море представляет собой полузамкнутый бассейн со сложной прибрежной геометрией (Рис. 20). Балтийский центр мониторинга и прогнозирования (BALMFC) обеспечивает прогнозы волн для Балтийского моря с горизонтальным разрешением 1 морская миля (1,85 км) [90], однако для качественного описания сложных прибрежных районов требуется более высокое разрешение. Было предложено использование двух вложенных сеток, наименьшее разрешение вложенной сетки составило 0,1 морской мили. Кроме того, регулярные прогнозы составляются при помощи модели WAM. Однако темпы развития и количество возможных приложений показали необходимость в апробации модели WW3, поэтому была проведена работа [91], демонстрирующая качество предсказаний волновых параметров.

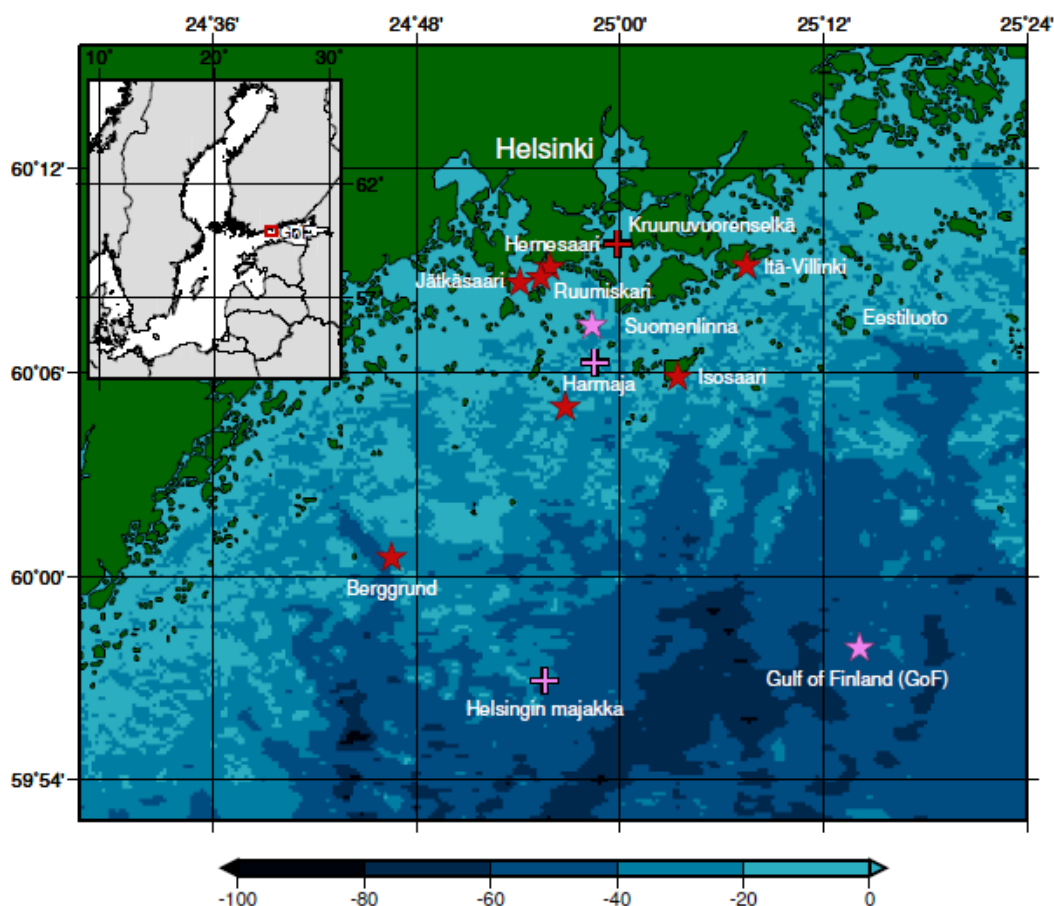


Рис. 20. Область Балтийского моря, содержащая Финский залив. Звездами обозначены волновые буи, крестами - метеостанции.

Для изучения характеристик волновых моделей и их параметризаций необходимы высококачественные наборы данных. В прибрежной зоне Хельсинки набор данных был собран в течение периода с 2012 по 2016 год, который состоит из измерений волновых буйев в многочисленных местах Хельсинкского архипелага (см. Рис. 21). Большая часть данных была собрана в рамках проекта по заказу города Хельсинки [92].



Рис. 21. Исследуемая акватория, Финский залив вблизи г.Хельсинки. Буй Suomenlinna обозначен красным цветом цифрой 1, метеостанции обозначены желтым цветом, цифра 2 – Narmaja, цифрой 3 - Eestinluoto.

Для анализа качества расчетов оригинальной модели WW3 и предложенной адаптированной WW3 были выбраны два дня 01.10.16 - 02.10.16. В выбранный период распределение ветра на близлежащих метеостанциях показало, что преобладает ветер с направления запад-юго-запад. Это соответствовало тому, что ветер дул вдоль залива, однако область, в которой производилось сравнение, находилась за мысом, кроме того, в прибрежной области находилось большое количество небольших островков, что обеспечивало разгон волн в интервале 10-30 км. При наблюдаемых скоростях ветра это соответствует безразмерному разгону 500-10000, что значительно меньше характерных для полностью развитого волнения значений (25000 и более). Распределение ветра на

метеостанции Нармаја (60.1, 24.97) представлено на Рис. 22 (слева) и на метеостанции Eestinluoto (60.1, 25.2) - на Рис. 22 (справа).

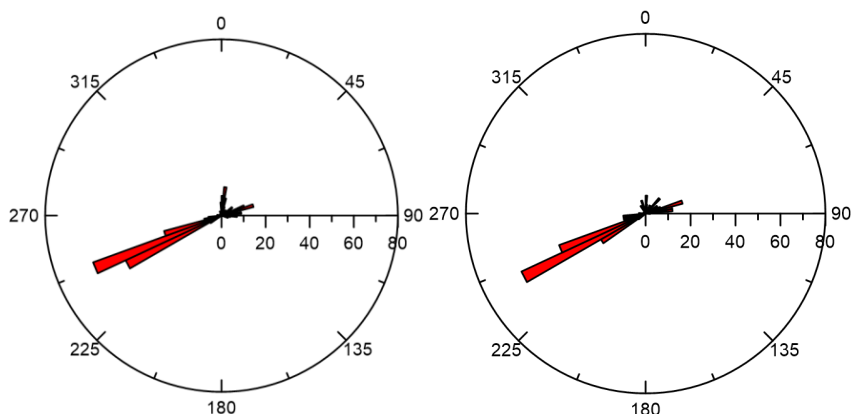


Рис. 22. Распределение ветра на метеостанции Нармаја (слева), на метеостанции Eestinluoto (справа).

Были использованы измерения волнового буйа Суоменлинна (Datawell Directional Waveriders, Mk-III) для изучения производительности и различия между оригинальной моделью WW3 и предложенной адаптацией к условиям коротких разгонов. Буй был установлен Финским метеорологическим институтом в прибрежной зоне Финского залива около островов Суоменлинна в координатах N 60.1, E 24.97. Данные, накопленные буюм, состояли из значительных высот волн, частоты пика волн, направления волн, полученных по усредненным за каждые 30 минут данным.

Моделирование проводилось при подключении оригинальной параметризации накачки волн ветром WAM 3 и параметризации WAM 3 с измененным коэффициентом аэродинамического сопротивления C_D . Конфигурация WW3 определялась регулярной сеткой с малым шагом в 0,1 морской мили (185 м), таким образом образуя прямоугольную сетку 281×241 с координатами левого нижнего угла N 59.87, E 24.47, шаги по направлениям составили 0.0034^0 и 0.00167^0 соответственно. Был задан неоднородный форсинг ветра при помощи моделиHIRLAM. Полученное распределение значительной высоты волнения в прибрежной зоне Финского залива при использовании параметризации ST1 с новым предложенным коэффициентом аэродинамического сопротивления поверхности C_D представлено на Рис. 23.

Было продемонстрировано, что полученная при аналогичных условиях коротких разгонов (диапазон значений безразмерного разгона был близок 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 буев, расположенных в прибрежной зоне Финского залива.

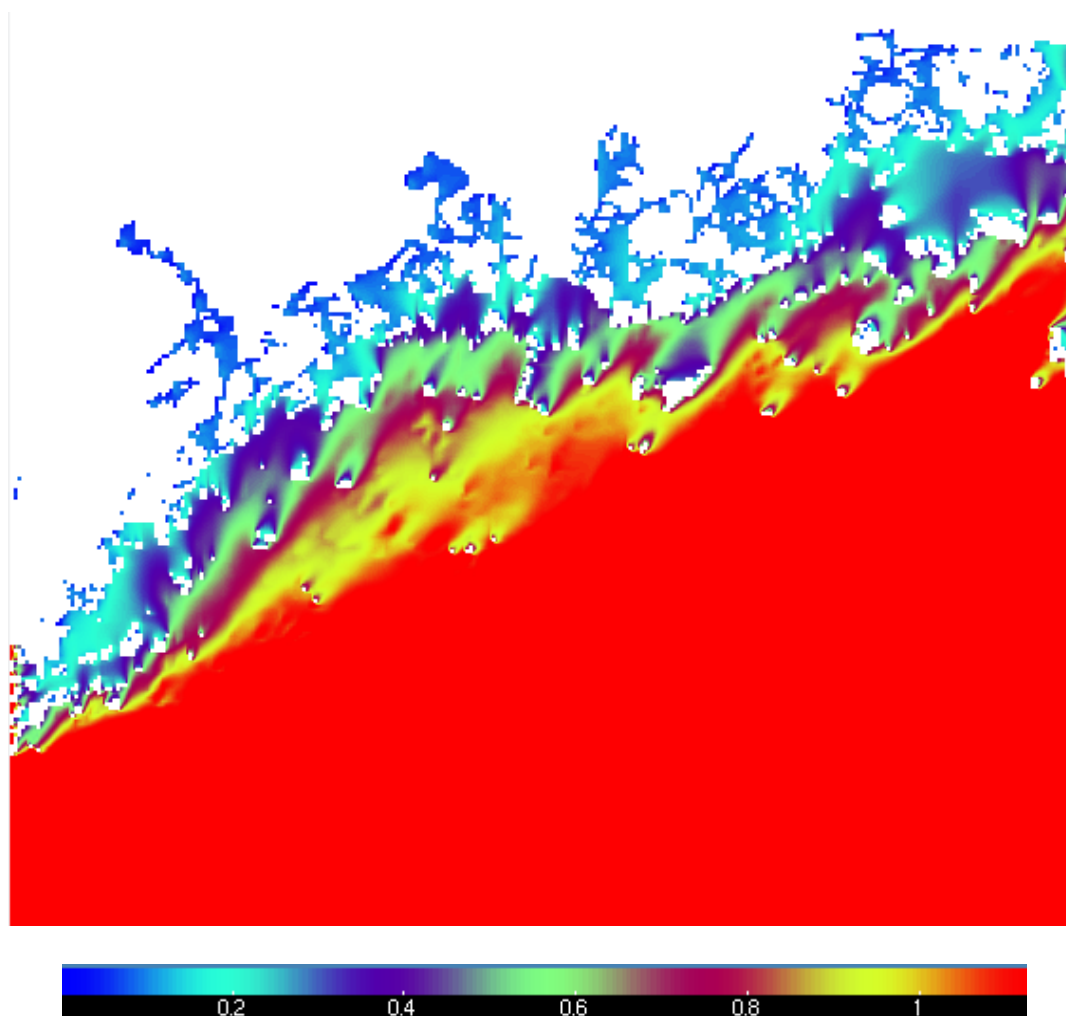


Рис. 23. Распределение значительной высоты волнения в прибрежной зоне Финского залива (при использовании параметризации ST1 с новым предложенным коэффициентом аэродинамического сопротивления поверхности C_D).

Расчеты, проведенные в рамках оригинальной параметризации WAM 3 и параметризации WAM 3 с измененным C_D , верифицированы данными с буя Суоменлинна. Использование новой параметризации C_D уменьшает различие значительной высоты волнения по данным натуральных измерений от результатов моделирования с 0-20% до 0-4% (Рис. 24). Наибольший эффект наблюдается при сильных ветрах (больше 8 м/с). 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. Использование предложенной адаптации WW3 существенно не повлияло на значения средних периодов волнения.

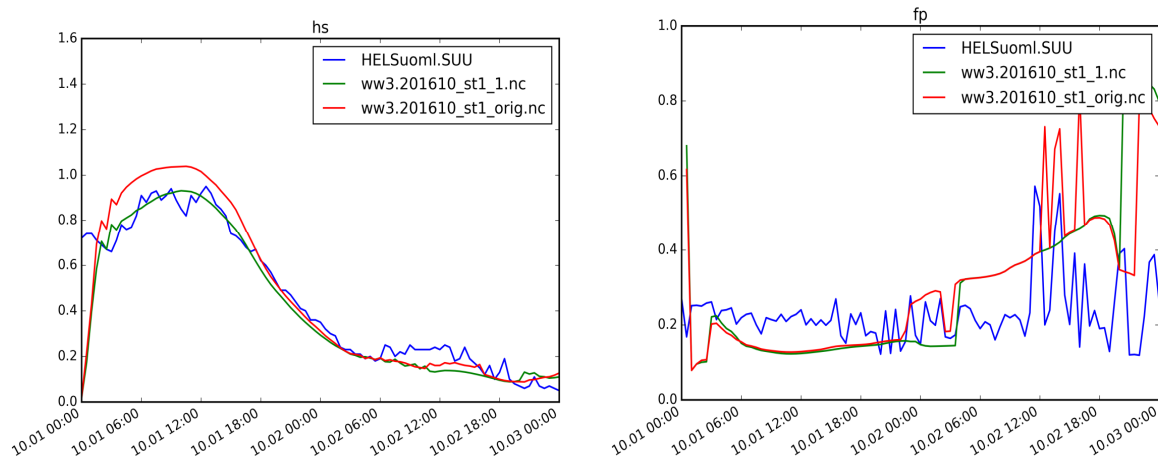


Рис. 24. Сравнение данных расчета (красным цветом обозначены данные при подключении стандартной параметризации ST1, зеленым - при подключении параметризации ST1 с новым предложенным коэффициентом аэродинамического сопротивления поверхности C_D) и данных измерений буя Суоменлинна. (а) Значительные высоты волнения, (б) средние периоды волнения.

3.3. Апробация WAVEWATCH III в прибрежной зоне Персидского залива

Модель WW3 была применена также на акватории Персидского залива. Особенность Персидского залива состоит в его погодных условиях, которые значительно меняются в зависимости от сезона. Для тестовых расчетов были выбраны дни в зимний период, поскольку в среднем зимой наблюдаются северо-западные направления ветра [93]. Ветер обычно дует с фиксированного направления в течение долгого времени, и это позволяет изучать волновые спектры при разных разгонах. Параметры ветровых волн при коротких разгонах представляют особый интерес.

Для моделирования использовались данные ETOPO1 для подготовки "файл-маски" и батиметрии (Рис. 25). Результирующая дискретизация пространственной сетки составляет $0,05^\circ$ в обоих направлениях. Для задания ветра был использован реанализ CFSv2 с минимально возможным пространственным разрешением $0,205^\circ$. Чтобы учесть энергию волн, приходящих извне, в моделирование была включена акватория Оманского залива по аналогии с исследованием [94].

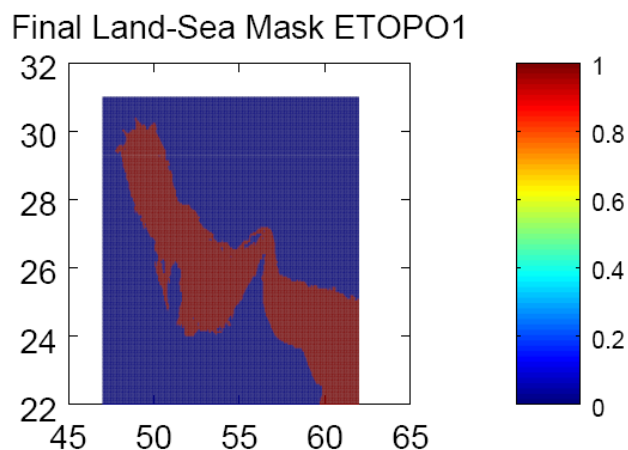


Рис. 25. "Файл-маска", отображающий топографию исследуемой области Персидского залива с включением Оманского залива.

Направление ветра изменяется в диапазоне с запада-северо-запада до северо-запада. Точки 1, 2, 3, отмеченные на Рис. 26, демонстрируют разный разгон, и для точки 1 он составляет приблизительно 50 км, для точки 2 ≈ 200 км, для точки 3 ≈ 250 км.

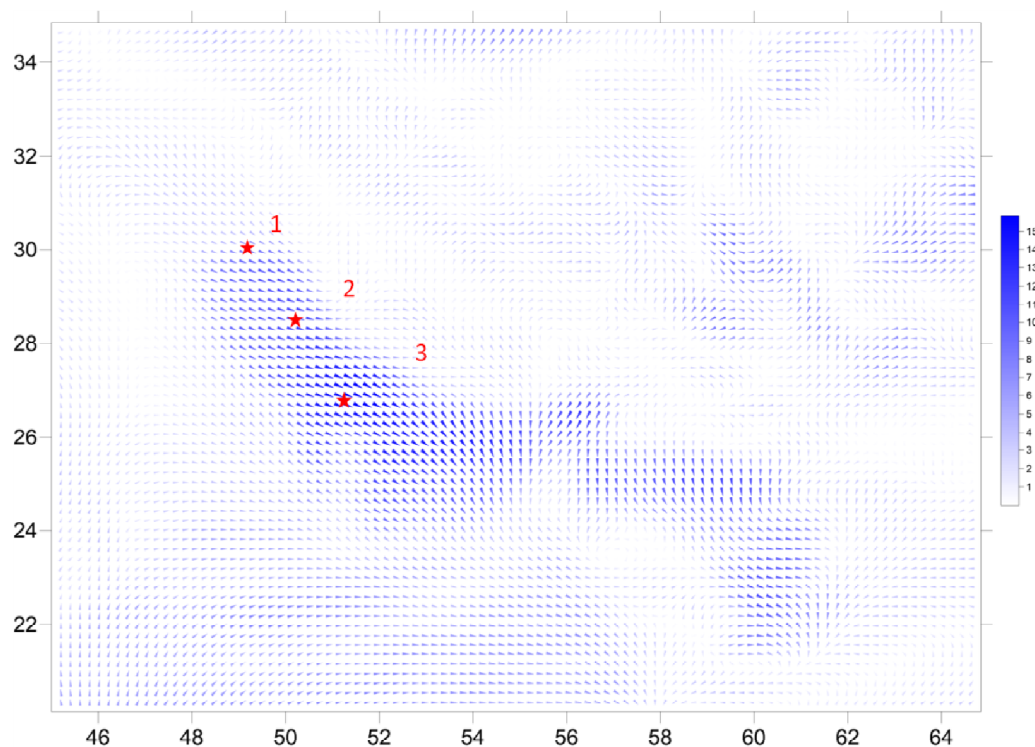


Рис. 26. Распределение скорости и направления ветра над исследуемой акваторией.

Обозначены точки 1, 2, 3 с разным разгоном ветра.

Результатирующее распределение значительных высот волн получалось для двух типов параметризации входного ветра: ST4 и ST6 (Рис. 27).

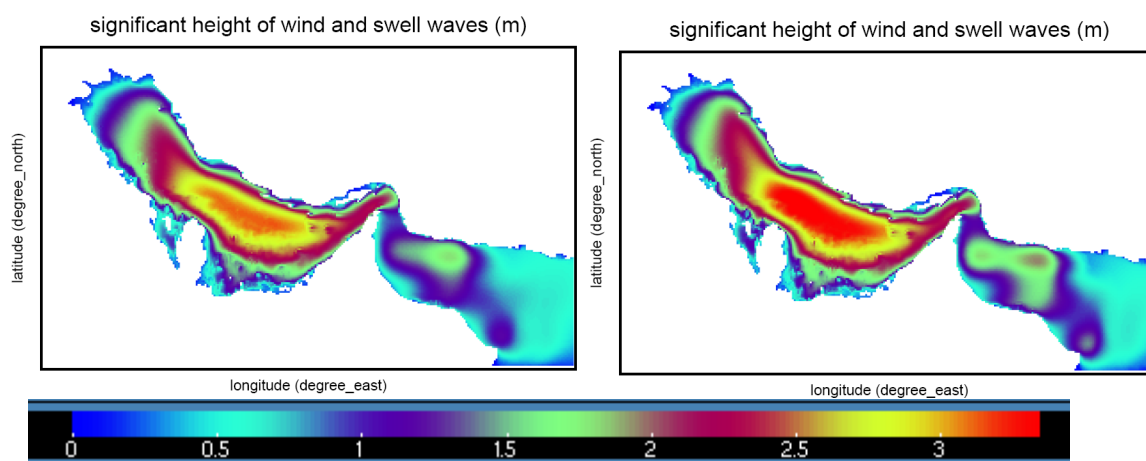


Рис. 27. Распределение значительных высот волн при подключении параметризации ветровой накачки ST4 (слева) и ST6 (справа)

Значения значительных высот волн, полученных при параметризации ST6, в среднем на 15% выше, чем значения, полученные при параметризации ST4. Данное различие в результатах расчета разных параметризаций требует последующей проверки, например, при помощи данных спутниковой альтиметрии, что проделано в [95].

Особый интерес состоял в том, чтобы сравнить поведение модели на коротких

разгонах в точке 1. В Главе 2 описана адаптация модели WW3 к условиям коротких разгонов. Предложенная адаптация повышает точность моделирования и делает возможным применение этого метода для получения прогнозов поверхностных ветровых волн на водных объектах. Этот метод дает хорошее соответствие данным буя в прибрежной зоне Финского залива, описанное выше.

Таким образом, предложенный метод применяется в Персидском заливе вместе с параметризацией входных ветров ST4 и ST6. Различия в расчетах волновой модели в точке 1 приведено на Рис. 28. Из Рис. 28 видно, что значения значительных высот волны в точке 1 отличаются в зависимости от параметризации функции источника накачки ветром, при этом наиболее низкие прогнозируемые значения предлагает модель ST4 и самые высокие - ST6. Результаты параметризации WAM 3 и адаптированной к условиям коротких разгонов WAM 3 расположены между результирующими кривыми ST4 и ST6. В то же время для периода средней волны ST6 прогнозирует значения на $\approx 10\%$ выше, чем для других рассмотренных параметризаций. Таким образом, для ряда параметризаций показана применимость модели WW3 в прибрежной зоне Персидского залива в условиях коротких разгонов.

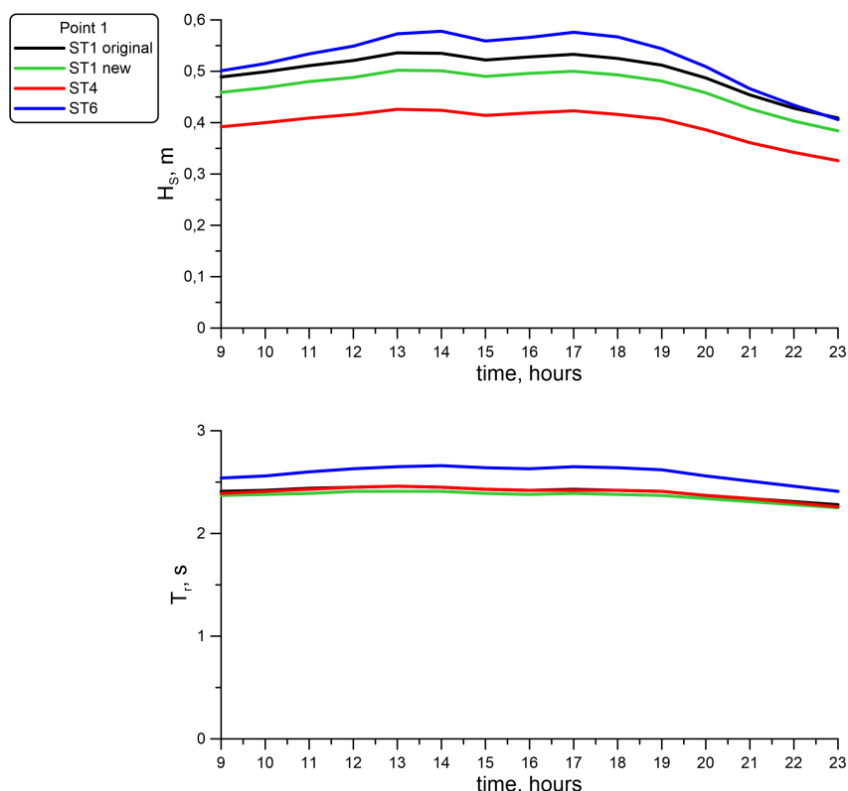


Рис. 28. Расчетные значения значительных высот волн (сверху) и средних периодов волн (снизу) при подключении параметризаций ST1 (черным), новой адаптированной ST1 с предложенным коэффициентом аэродинамического сопротивления C_D (зеленым), ST4 (красным), ST6 (синим).

3.4. Апробация модели WW в экстремальных условиях атлантического циклона

3.4.1. Введение

Тропические циклоны, или ураганы, непосредственно влияют на безопасность жизнедеятельности в прибрежных регионах и могут наносить существенный ущерб прибрежной инфраструктуре [96]. На сегодняшний день средняя интенсивность возникающих штормов возрастает в связи с изменениями климата [97]. Ураганы сопровождаются сильными ветрами, которые создают большие волны, опасные для прибрежных районов с точки зрения их затопления и возможной эрозии береговой линии. В то же время, высокоточные прогнозы погоды и состояния морской поверхности позволят обеспечить безопасность населения и минимизировать потери от такого рода природных явлений. Разработка методов численного моделирования, его верификация и совершенствование физических параметризаций в моделях прогноза необходимы для корректного предсказания явлений тропических циклонов. Предсказание урагана влечет необходимость в точном прогнозе волнения, вызванного ураганом.

Моделирование волнения может быть произведено в рамках современной волновой модели третьего поколения WW3. В ней содержатся различные параметризации физических процессов, включая параметризации, полученные для ураганных условий [98, 99]. На основе полученных в результате численного моделирования значений средних параметров волн и ветра можно произвести оценки параметров обменных процессов на границе океана и атмосферы в ураганных условиях.

3.4.2. Конфигурация модели

Моделирование поверхностных волн произведено для урагана Ирма, который продолжался в период 30/08/2017 - 12/09/2017 в Атлантическом океане. Ураган Ирма был очень мощным и разрушительным ураганом типа "Кабо-Верде", развивался от тропической волны около островов Кабо Верде 30 августа 2017, быстро перерос до 3 категории по шкале Саффира-Симпсона 31 августа 2017. В последующие дни интенсивность урагана менялась, однако 4 сентября Ирма продолжила набирать интенсивность, и на следующий день ей была присвоена 5 категория опасности. Наилучшим образом трек Ирмы был составлен в Национальном центре исследования ураганов США (USA National Hurricane Center), и приведен на Рис. 29 на основе данных отчета о тропическом циклоне [93].

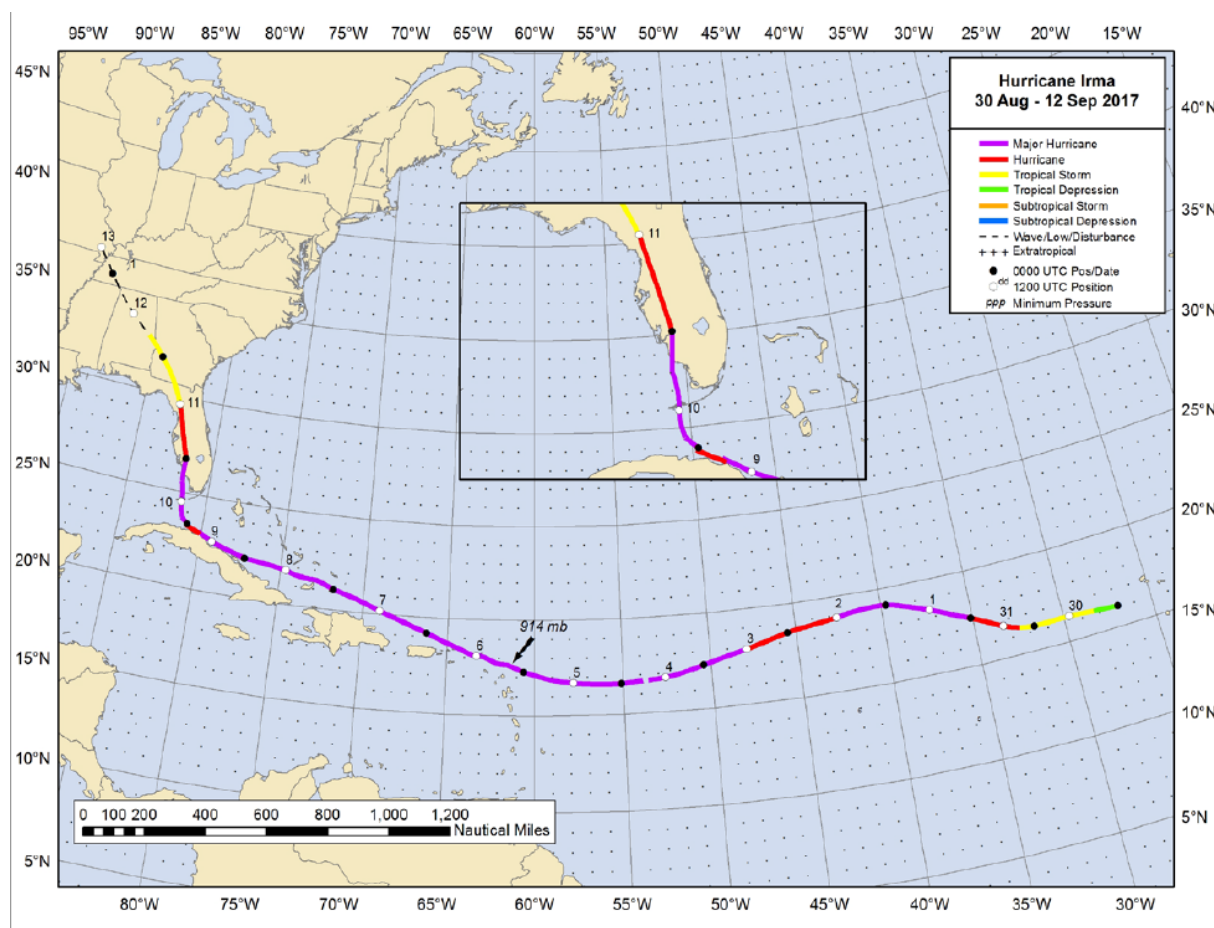


Рис. 29. Трек урагана Ирма, 30 августа – 12 сентября 2017, данные [93].

Волнение, создаваемое атлантическим ураганом Ирма, было рассчитано в рамках модели WW3. Был рассмотрен период с 01/09/2017 по 04/09/2017, при этом ураган сформировался 30/08/2017 и распался 12/09/2017. Область расчета была ограничена долготами от 14 до 24 градусов и широтами от 280 до 330 градусов. Для описания батиметрии были использованы данные ETOPO1. Развитие волн происходило под действием данных о распределении ветра из реанализа CFSv2 с разрешением $0,205^{\circ}$. Моделирование выполнялось на кластере ИПФ РАН.

Была проведена оценка чувствительности результатов моделирования параметров волн к использованию модели ветровой накачки ST4 - Ardhuin et al. и ST6 - Babanin et al. Моделью было воспроизведено вращение и движение урагана. На Рис. 30 показаны типичные фазы развития ураганов и увеличение его интенсивности. Получена асимметрия распределения поля поверхностных волн. Значение расчетных параметров волнения при применении параметризации ST6 выше соответствующих значений при применении ST4 примерно на 20%.

Значения рассчитанных значительных высот волн (H_s), создаваемых ураганом, сравнивались с данными буев NDBC. Сравнение данных было произведено в трех

локациях, соответствовавших расположению буев, и приведено на Рис. 31. Координаты буя 41040 (307.28, 14.45); буя 41043 (295.17, 21.12); буя 41044 (301.26, 21.71). Частотный диапазон буев NDBC изменяется от 0.02 до 0.485 Hz. Особенности оборудования и способа извлечения данных буев NDBC описаны в [100].

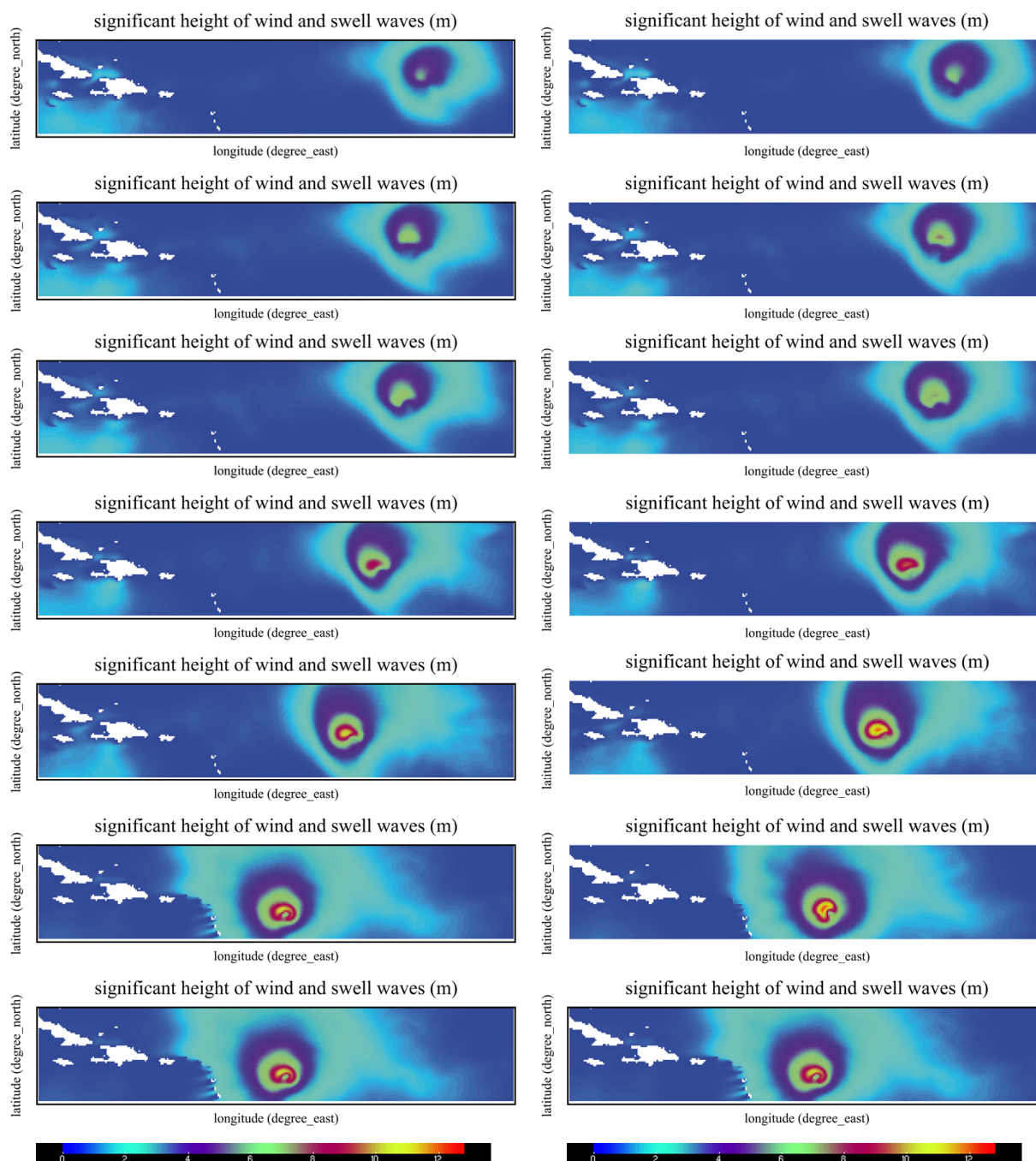


Рис. 30. Эволюция распределения значительных высот волн при урагане Ирма, расчет выполнен в рамках волновой модели WW3 с параметризацией ST4 (слева) и ST6 (справа) в период 02/09/17 - 04/09/17.

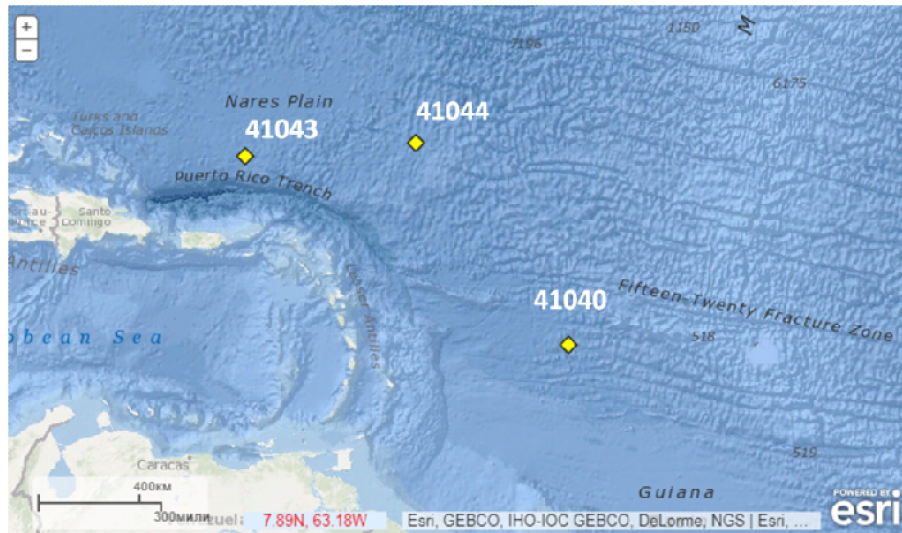


Рис. 31. Расположение используемых буюв NDBС на карте.

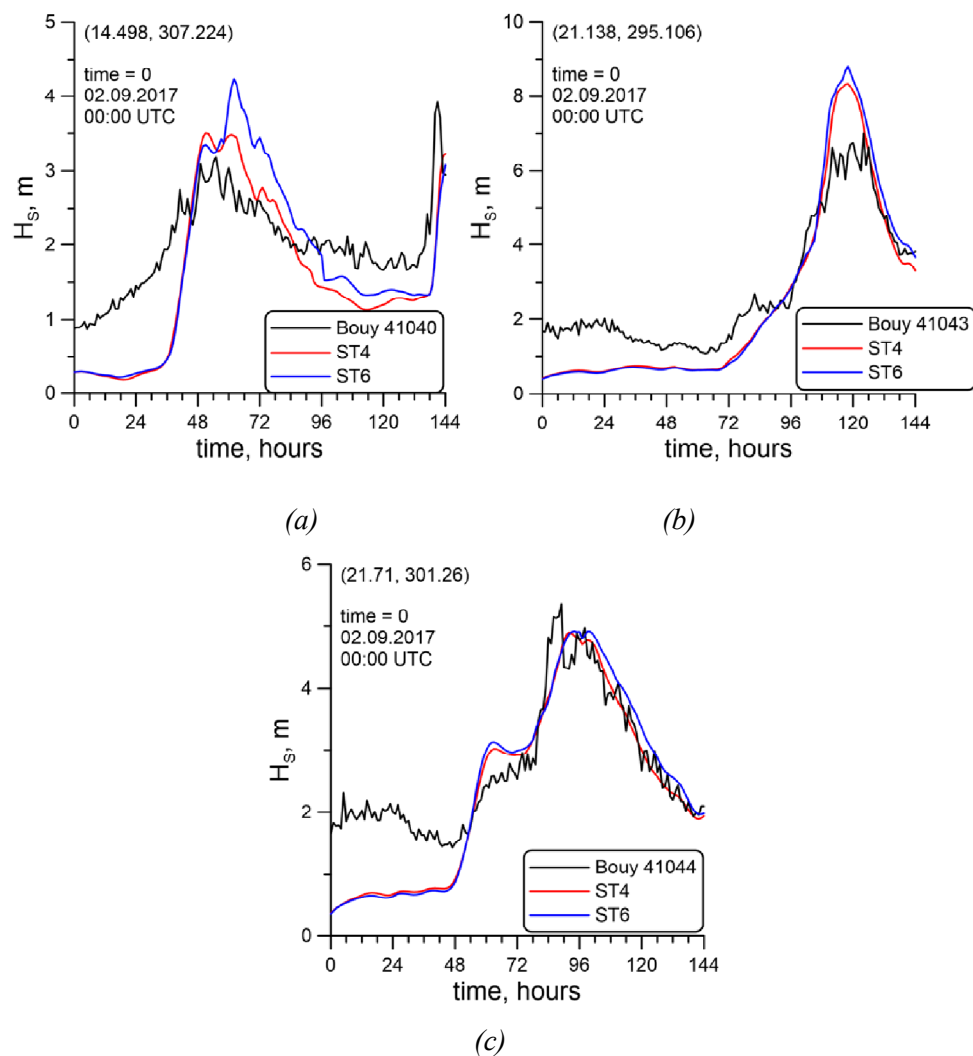


Рис. 32. Значительные высоты волн в точках расположения буюв, рассчитанные в модели WW3 с параметризацией ST4 (красная линия), ST6 (синяя линия), и данные измерений буюа (черная линия) в период 02/09/2017 - 08/09/2017. (a) – буюа 41040, (b) – буюа 41043, (c) – буюа 41044.

Получено хорошее соответствие данных между наблюдаемыми значениями H_s и результатами, полученными при помощи WW3 в условиях тропического циклона как для ST4, так и для ST6. Значения H_s в расчетах демонстрируют резкий рост, при этом в данных буюв этот рост происходит плавно. Рассчитанные моделью экстремальные значения в условиях высоких скоростей ветра имеют близкие результаты и незначительные отклонения от данных, измеренных буюв, при подключении обеих параметризаций. В то же время значения H_s занижены при умеренных скоростях ветра. Этот результат действителен как для параметризации ST4, так и для ST6, что может быть связано с тем, что в конфигурации модели учитывается не весь объем зыби, генерируемой ураганом. Вопрос предсказания данных о зыби требует дальнейших исследований.

3.4.3. Оценка параметров обменных процессов между океаном и атмосферой

На основе полученных данных была проведена оценка параметров обменных процессов на границе океана и атмосферы в ураганных условиях. Нужно отметить, что эти данные носят предварительный характер и могут быть усовершенствованы в ряде направлений.

Используя полученные результаты значений поля ветра и волн, мы провели оценки коэффициента поверхностного сопротивления и эффектов, связанных с образованием морских брызг. При этом был учтен эффект, который недавно был назван основным механизмом образования брызг при сильных ветрах, фрагментация типа «парашют» (см [101-103]). Механизм представляет собой раздувание и последующий разрыв короткоживущих, парусоподобных возвышений водной поверхности. Этот процесс аналогичен режиму фрагментации типа «парашют» капель жидкости и струй в потоках газа.

На основе полученных данных была предложена функция генерации брызг для механизма разрыва типа "парашют", зависящая от разгона волн и удовлетворяющая одновременно лабораторным и натурным условиям, с использованием безразмерного числа Рейнольдса (Re) [104]:

$$Re_B = \frac{u_*^2}{\omega_p \nu} \quad (25)$$

Здесь u_* - динамическая скорость ветра, ω_p - пиковая частота поверхностных ветровых волн, ν - кинематическая вязкость воздуха. Была подобрана наилучшим образом описывающая экспериментальные данные функция, которая показала, что точное число «парашютов» может быть установлено следующим уравнением (см. Рис. 33 а):

$$\langle N \rangle = M_0 Re_B^{2/3} \exp\left(-\frac{M_1}{Re_B^{2/3}}\right), \quad (26)$$

где $M_0=2.08$, $M_1=972$.

С учетом статистики событий, связанных с образованием брызг, можно оценить вклад брызг в процессы обмена между атмосферой и океаном (см. [103, 105]). В частности, это позволяет объяснить необычную немонотонную зависимость коэффициента сопротивления морской поверхности от скорости ветра (см. Рис. 33 б).

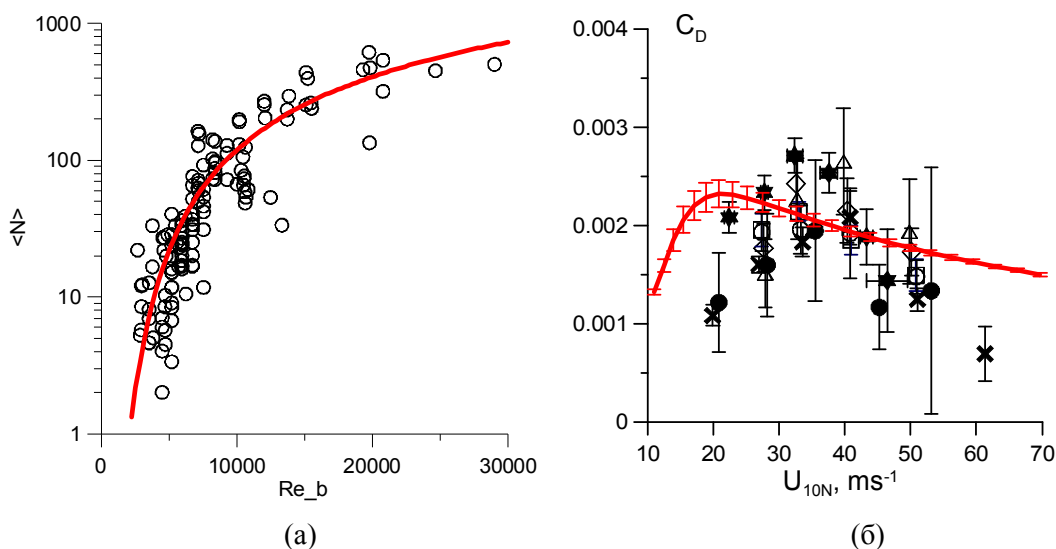


Рис. 33. а) Точное число "парашютов" в зависимости от числа Рейнольдса б) Коэффициент аэродинамического сопротивления в зависимости от скорости ветра. Красная линия - оценки модели из [101, 103] для параметра возраста волнения $\Omega=3$, символы представлены для имеющихся экспериментальных данных [106-109].

Кривая на Рис. 33 б была получена для некоторого параметра возраста волнения, определяемого как отношение скорости поверхностного ветра U_{10} к фазовой скорости волн, соответствующих пику в частотном спектре поверхностных волн c_p , $\Omega = U_{10}/c_p$. Мы оценили коэффициент поверхностного сопротивления для параметров волн, рассчитанных в модели WW3 для урагана Ирма. На Рис. 34 показаны примеры распределения параметров, определяющих образование брызг и связанных с ними параметров обмена. На Рис. 34 а показано поле скорости и направление ветра в урагане Ирма в соответствии с реанализом CFSv2. На Рис. 34 б показано распределение частоты пика спектра, рассчитанной в модели WW3. На Рис. 34 в приведено распределение коэффициента поверхностного сопротивления, оцененное для параметров на Рис. 34 а, б, с учетом вклада морских брызг и пены. Продемонстрировано уменьшение коэффициента сопротивления

поверхности в области сильных ветров. Выраженная асимметрия распределения поверхностного сопротивления по направлению движения центра шторма отражает асимметрию распределения приземного ветра и волнового поля.

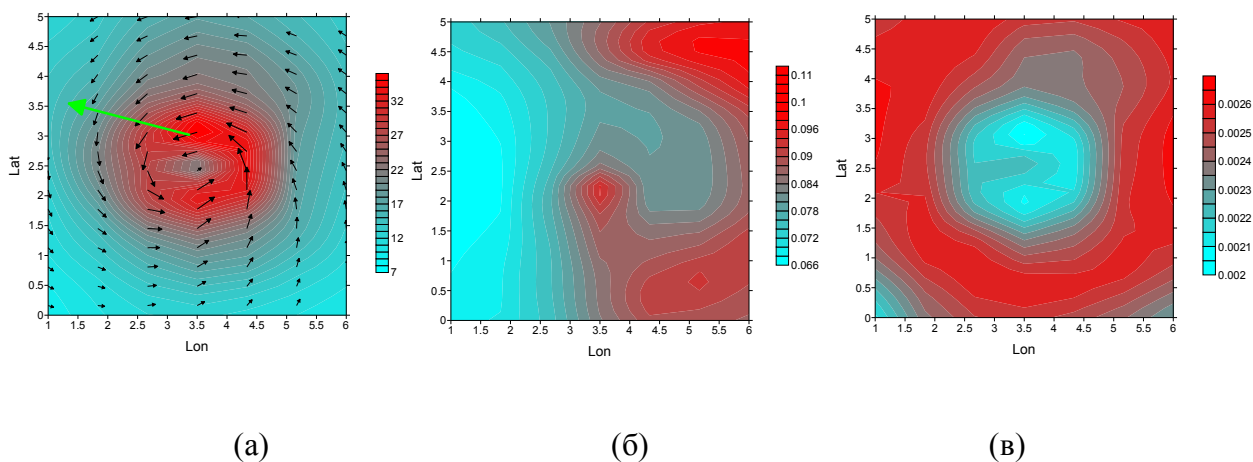


Рис. 34. Распределение поля ветра (а), частоты пика спектра (б) и коэффициента аэродинамического сопротивления поверхности (в). На Рис. 29 (а) черными стрелками обозначено направление ветра, большая зеленая стрелка указывает направление движения урагана, цветовые шкалы представлены в м/с. На Рис. 29 (б) цветовая гамма представлена в Гц. На Рис. 29 (в) цветовая шкала безразмерна. горизонтальная ось - относительная долгота, вертикальная ось - относительная широта, оба представлены в градусах.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о важности учета эффекта брызг и пены на результаты численного моделирования средних параметров волнения. Запланированы работы по внедрению учета эффекта брызг и пены в функцию источника ветровой накачки волновой модели.

3.5. Заключение

В прибрежной зоне Финского залива проведены расчеты при помощи адаптированной модели WW3 и верифицированы данными с буя Суоменлинна. Использование новой параметризации C_D уменьшает различие значительной высоты волнения по данным натуральных измерений от результатов моделирования с 0-20% до 0-4%. Наибольший эффект наблюдается при сильных ветрах (больше 8 м/с). 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. Использование предложенной адаптации WW3 существенно не повлияло на значения средних периодов волнения.

Проведено моделирование поверхностного волнения в прибрежной зоне Персидского залива. Проведено сравнение расчетных данных для средних параметров волнения при подключении разных параметризаций на коротких разгонах. Показана применимость модели WW3 в прибрежной зоне Персидского залива в условии коротких разгонов.

Произведено численное моделирование поверхностного ветрового волнения в рамках модели WW3 при использовании данных о ветре из реанализа CFSv2 для урагана Ирма. Модель воспроизводит вращение и движение урагана. Получена асимметрия распределения поля поверхностных волн. Произведено сравнение вычисленной значительной высоты поверхностных волн, вызванных ураганом, с данными буев NDBC. В целом между наблюдаемыми значениями H_s и результатами волновой модели WW3 в условиях тропических циклонов получено хорошее соответствие как для параметризации ST4, так и для ST6. С использованием статистики событий, связанных с образованием брызг, оценивается вклад брызг в процессы обмена атмосферы и океана. Получено уменьшение коэффициента поверхностного сопротивления в области сильных ветров. Асимметрия распределения поверхностного сопротивления по направлению движения центра шторма отражает асимметрию распределения ветрового и волнового поля. Запланированы работы по внедрению учета эффекта брызг и пены в функцию источника ветровой накачки волновой модели.

ГЛАВА 4. ОБЪЕДИНЕНИЕ ВОЛНОВОЙ МОДЕЛИ WAVEWATCH III И АТМОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ WRF (WEATHER RESEARCH & FORECASTING)

4.1. Введение

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. 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.

4.2. 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. Кроме того, данные реанализа тем точнее, чем больше происходит ассимиляции данных в рассматриваемой области. В рассматриваемой области Горьковского водохранилища находятся только 2 метеостанции (Волжская ГМО, Юрьевец), но они находятся на побережье, при этом было установлено, что значения скорости ветра на берегу в значительной мере отличаются от таковых над акваторией водоема. В связи с этим использование данных реанализа в чистом виде неправильно. Но необходимо отметить, что вынужденное задание ветра над водоемом однородным может являться источником ошибок в численном эксперименте, поскольку вытянутая форма водоема, высокие берега, могут приводить к заметной пространственной изменчивости с масштабами порядка или менее 1 км. Неоднородность ветра над водохранилищем подтверждает проведенное нами изучение ветрового режима над акваторией (см Рис. 35).

Таким образом, предлагается способ расчета с учетом данной пространственной изменчивости при помощи ветровой накачки из модели WRF. 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 [110].

Данный способ задания ветровой накачки из атмосферной модели WRF был осуществлен, например, в работе [111]. В данной главе будет использована описанная в Главе 2 адаптация WW3 к условиям коротких разгонов.

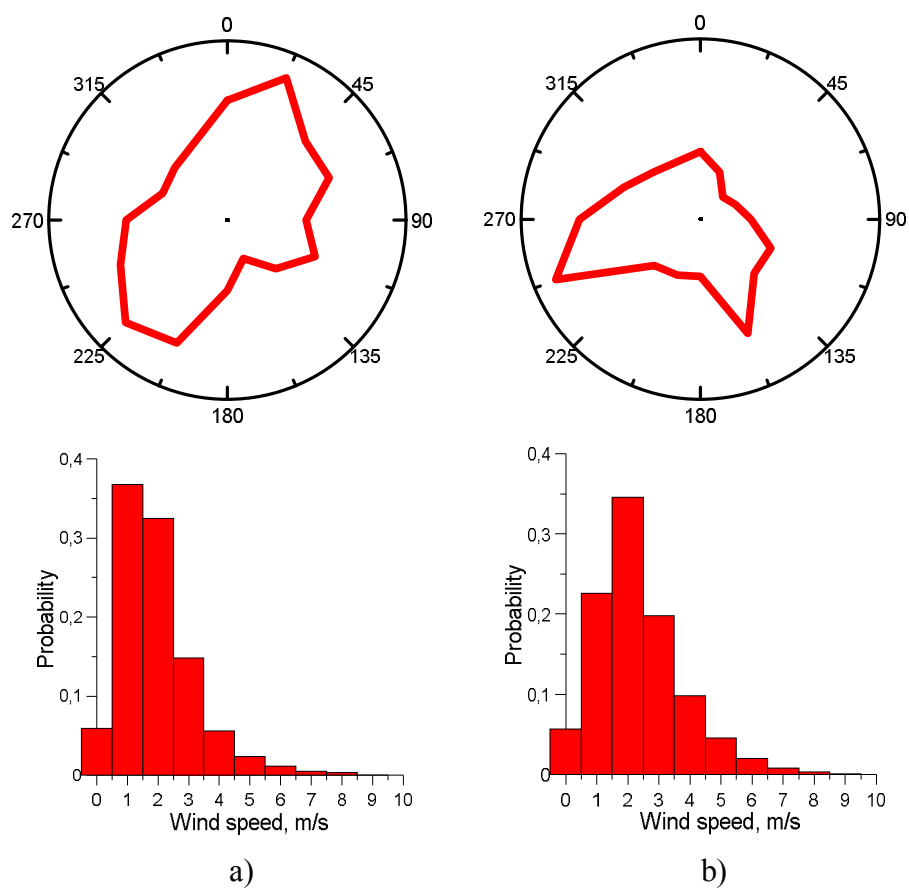


Рис. 35. Статистическое распределение направлений ветра (верхние графики) и скоростей ветра (нижние графики), усредненных за 2010–2015 годы за навигационный период (с 10 мая по 31 октября): а) Волжская ГМО, б) Юрьевец

4.3. Мезомасштабная модель атмосферы WRF

Модель метеорологических исследований и прогнозирования WRF-ARW (Advanced Research Weather Research and Forecasting), далее WRF, представляет собой систему численного прогнозирования погоды, предназначенную для нужд как атмосферных исследований, так и задач оперативного прогнозирования. Модель обслуживает широкий спектр метеорологических приложений в масштабах от нескольких метров до тысяч километров. Модель WRF была создана Национальным центром атмосферных исследований (NCAR) и Национальным управлением по океаническому и атмосферному воздействию (отделением Национальных центров по экологическому прогнозированию (NCEP)). WRF позволяет производить моделирование, отражающее либо реальные данные (наблюдения, анализы), либо идеализированные атмосферные условия. WRF обеспечивает оперативное прогнозирование, отвечающее современным достижениям в области физики, численных методов и ассимиляции данных, предоставляемыми многими исследовательскими группами по всему миру. В настоящее время WRF функционирует в оперативном режиме в NCEP и других центрах прогнозирования на международном уровне. Большая часть модели реализована на языке программирования Фортран, модули работы с данными реализованы на языке программирования С.

WRF-ARW состоит из трех основных блоков: система предварительной обработки (WPS, WRF Pre-Processing System), ядро модели (динамический модуль) и система подготовки и вывода выходных данных модели WRF Post-Processing. Система предварительной обработки WPS - это комплекс, состоящий из трех программ, осуществляющий подготовку входных данных для программы инициализации *real*. Первая программа – *geogrid.exe* - описывает область расчета, в ней производится интерполяция географических статических переменных (рельеф, типы почвы, гидрография) в узлы сетки. Вторая программа – *ungrib.exe* - производит усвоение метеорологических данных из формата GRIB. Третья программа – *metgrid.exe* - производит интерполяцию метеорологических полей в узлы сетки модели, которые были определены работой программы *geogrid.exe* (см Рис. 36, 37).

Далее производится инициализация модели WRF при помощи программы *real.exe*, где осуществляется вертикальная интерполяция начальных данных в орографические координаты модели и заготавливаются граничные условия на срок прогноза. После этого уже запускается расчет динамического ядра модели при помощи программы *wrf.exe*, в которой производится решение нелинейной системы дифференциальных уравнений в

частных производных, которая будет приведена ниже. Управление программами real.exe и wrf.exe осуществляется при помощи настроек в текстовом файле namelist.txt.

Выходные параметры расчета модели могут быть обработаны и визуализированы в системе постпроцессинга WRF Post-Processing множеством настроек (система вывода выходных данных модели). К наиболее популярным относятся использование кодов NCL и GrADS.

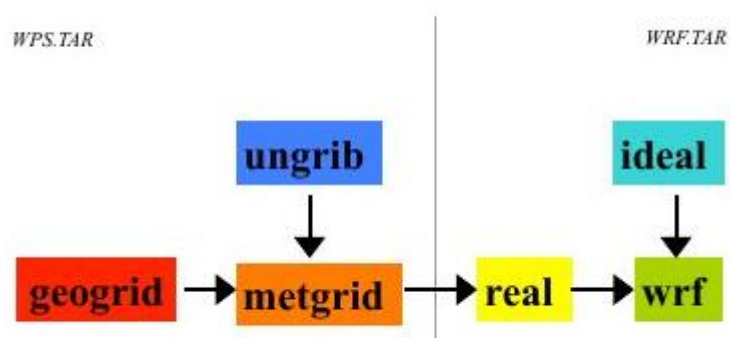


Рис. 36. Последовательность выполнения программ модели WRF-ARW.

Заимствовано из [7].

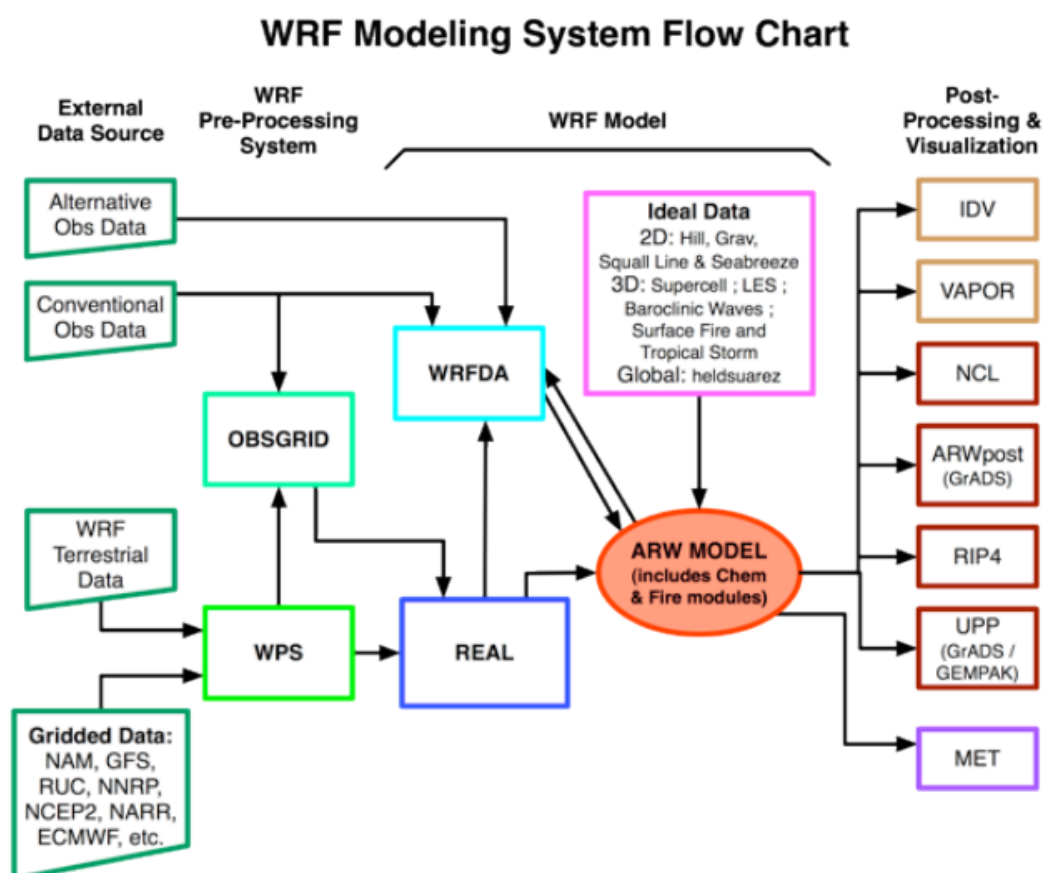


Рис. 37. Схема взаимодействия систем модели WRF. Заимствовано из [7].

В трехмерной негидростатической модели WRF решаются уравнения гидротермодинамики сжимаемой жидкости, осредненные по Рейнольдсу. Это позволяет вычислять горизонтальные и вертикальные компоненты скорости ветра, возмущения потенциальной температуры, геопотенциала и давления. Опционально могут быть рассчитаны турбулентная кинетическая энергия, влажность, осадки, облачность, потоки химических веществ. Уравнения модели записаны в декартовых координатах по горизонтали и с использованием орографической координаты η :

$$\eta = \frac{p_h - p_{ht}}{\mu}, \mu = p_{hs} - p_{ht}, \quad (27)$$

где p_{hs} и p_{ht} - гидростатическое давление на нижней и верхней границах области соответственно. η может изменяться от 1 на поверхности до 0 на верхней границе домена модели (Рис. 38).

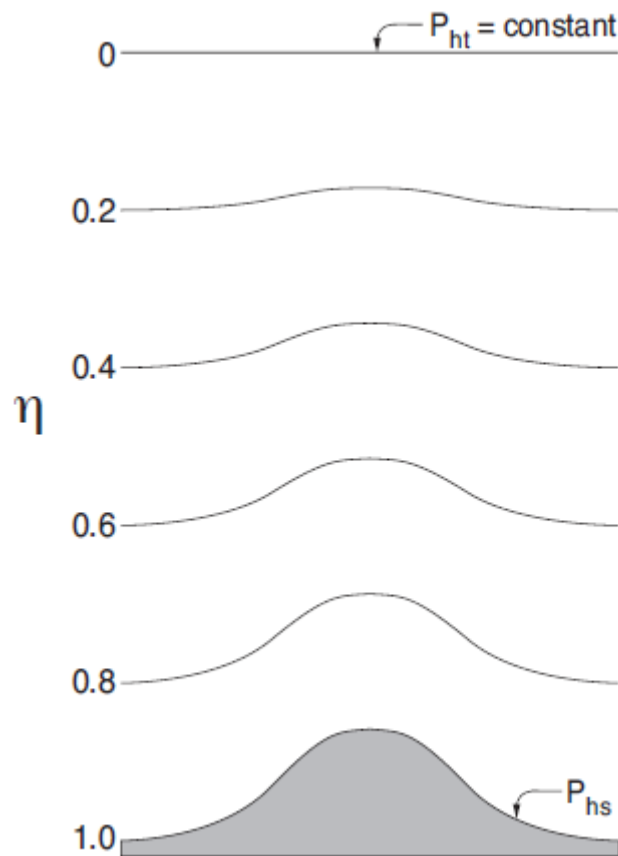


Рис. 38. Границы изменения орографической координаты η , используемой в WRF.

Заимствовано из [7].

Правая часть уравнений гидротермодинамики сжимаемой жидкости - это источники или стоки, соответствующие различным физическим процессам,

турбулентному перемешиванию, проекции на сферу, вращению Земли, введенным в модель в виде параметризаций. Параметризации WRF учитывают (см Рис. 39):

- Микрофизику.
- Облачность, осадки.
- Приповерхностный слой атмосферы.
- Планетарный пограничный слой атмосферы.
- Атмосферную радиацию.

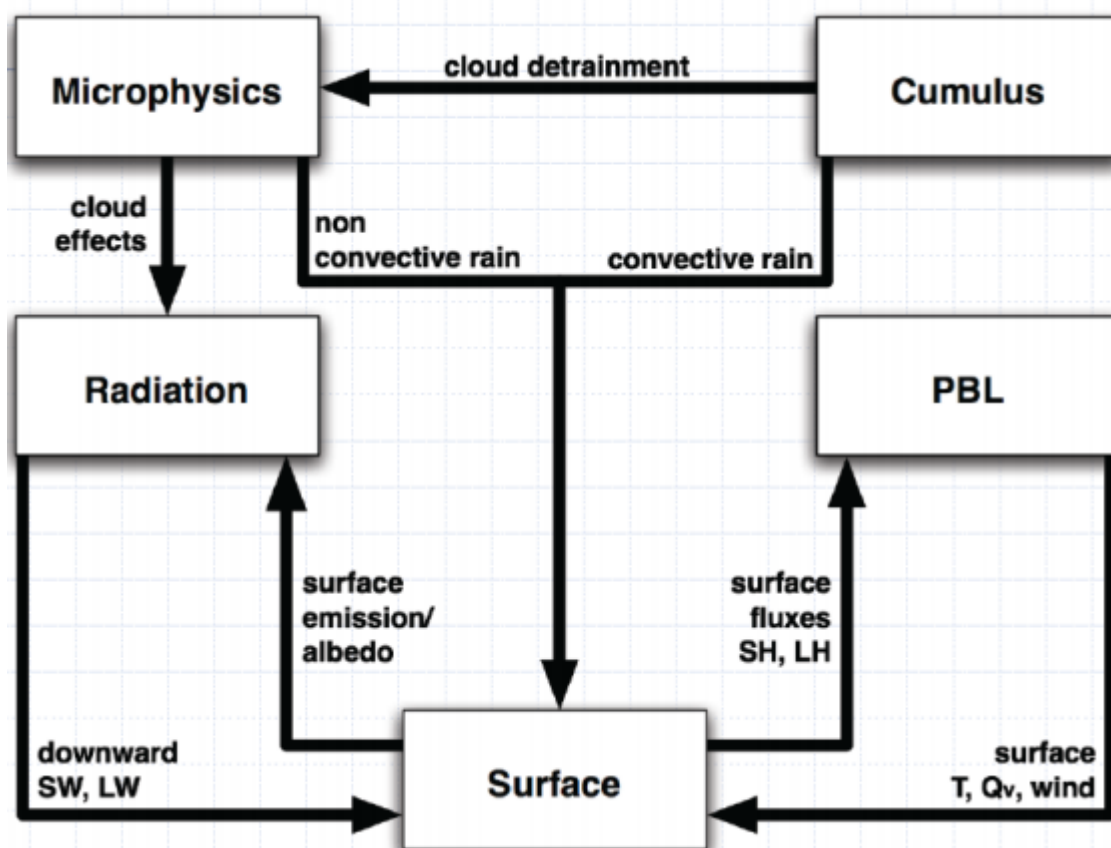


Рис. 39. Физические процессы, учтенные в модели WRF. Заимствовано из [7].

4.4. Моделирование распределения скорости ветра в рамках модели WRF

Для применения модели WRF для расчета ветра над Горьковским водохранилищем были предприняты следующие действия. В препроцессинговой системе WRF была произведена предварительная обработка данных для подготовки к использованию в программе `real.exe` для вычислений, соответствующих реальной метеорологической ситуации. Для модуля `geogrid.exe` были использованы рекомендованные для учета озёр географические данные «`modis_lakes`» для 4х вложенных доменов в интересующей нас области с минимальным размером ячейки четвертого вложенного домена 30 угловых секунд (Рис. 40 б). Эти данные были использованы для описания доменов и для интерполяции статичной географической информации на заданные сетки. Для описания текущей метеорологической ситуации подгружались метеорологические данные «Climate Forecast System Reanalysis Version 2 (CFSv2) (ds094.0)», обновляющиеся каждые 6 часов и извлекаемые из формата GRIB при помощи программы `ungrib.exe`. Программа `metgrid.exe` производила горизонтальную интерполяцию извлеченных метеорологических данных на сетки доменов. Затем моделирование модулями `real.exe` и `wrf.exe` выполнялся непосредственный расчет в опции MPI на кластере IAP RAS. Расчеты производились также при подключении различных параметризаций планетарного пограничного слоя (ППС) и приповерхностного слоя атмосферы, переключение между параметризациями осуществляется путем изменения `namelist.input` для модулей `real.exe` и `wrf.exe`. Параметры выходного ветра (`u10` и `v10`) использовались для моделирования WW3.

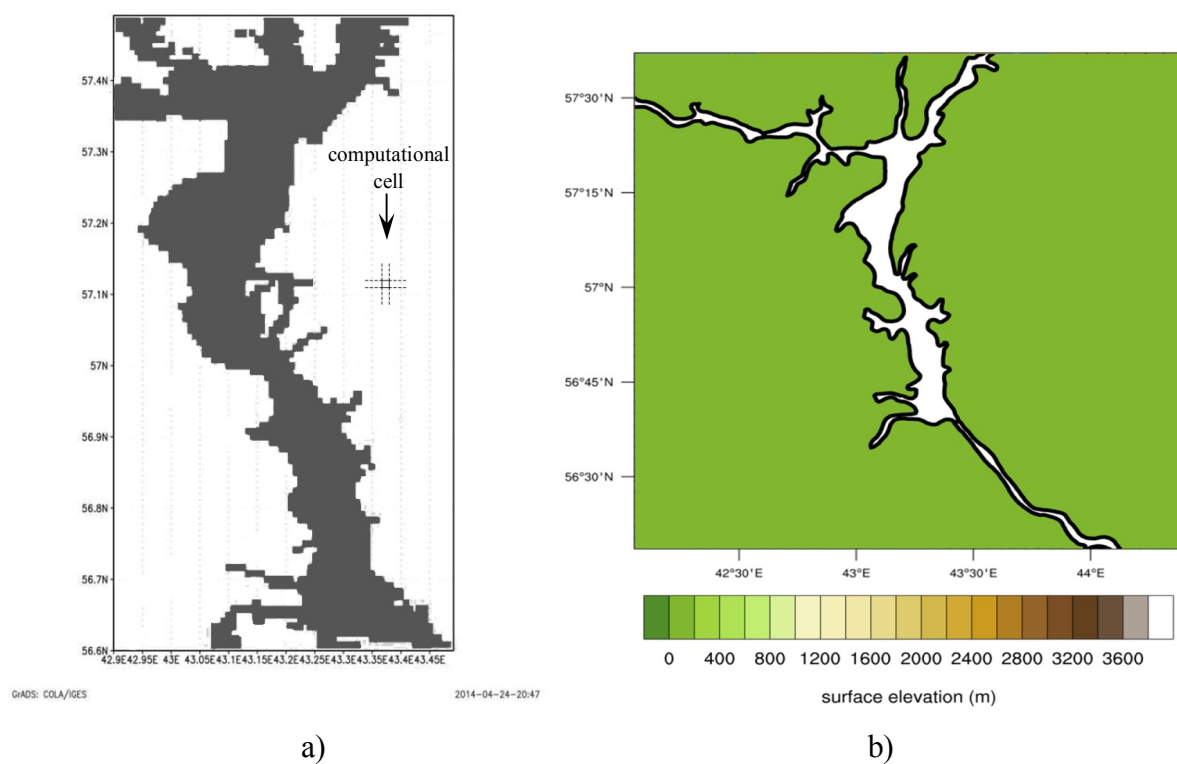


Рис. 40. Топографическая сетка Горьковского водохранилища. Указана вычислительная ячейка размером 0,008330. а) используемая в модели WW3, б) используемая в модели WRF.

4.5. Задание ветра в волновую модель WAVEWATCH III

Характерными при расчетах были слабые и умеренные ветра ($U_{10}=1\div 9$ м/с) разных направлений. Сначала к территории, содержащей Горьковское водохранилище, была применена версия WRF v.3.6. Расчеты показали заметную пространственную изменчивость ветра над акваторией водоема. Например, в расчетах для тестового дня 13.06.13 были получены результаты, приведенные на Рис. 41. Из рисунка видно, что распределение ветра над акваторией Горьковского водохранилища неоднородно как по модулю (обозначено цветом), так и по направлению (обозначено направленными отрезками).

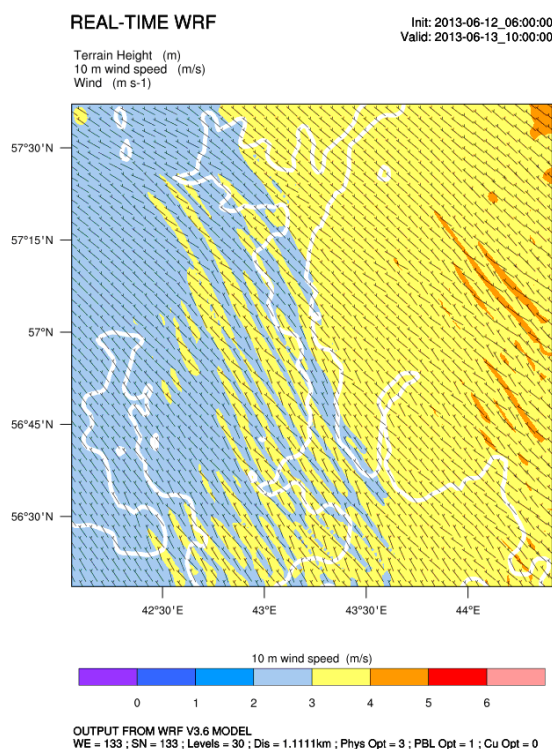


Рис 41. Распределение скорости и направления ветра над акваторией Горьковского водохранилища, рассчитанные в модели WRF v.3.6 для тестового дня 13.06.13.

Далее было проведено сравнение данных расчета параметров волнения в модели WW3 при использовании двух типов входных данных для задания ветровой накачки. Во-первых, это измеренные в эксперименте значения ветра, которые принимались сохраняющими постоянное значение над всей поверхностью Горьковского водохранилища, учитывалась лишь их изменчивость во времени. Расчет производился с обновляющимися каждые 15 минут входными данными, измеренными в натурном эксперименте: модуль и направление ветра на высоте 10 м, разность температур вода-воздух. Второй способ расчета был произведен с учетом пространственной изменчивости при помощи ветровой накачки из модели WRF v.3.6.

Расчеты волновой модели WW3 проводились с использованием предложенной нами параметризацией C_D и инкрементом ветровой накачки из WAM 3. Из Рис. 5 б видно, что при ветрах до 2,5 м/с значения C_D , полученные в результате натурального эксперимента, лежат выше значений C_D по океанской параметризации, а при скоростях ветра больше 3 м/с – ниже.

Использование данных расчета модели WRF обеспечивает пространственную изменчивость, однако значения скорости ветра лежат значительно ниже измеренных в эксперименте в тестовый день 13.06.13, что подтверждается также нижними графиками на Рис. 42, где показаны значения ветра, измеренные в эксперименте и осредненные по 15 минутам (прерывистая черная линия), осредненные по 60 минутам (черная линия) для удобства сравнения с ветром из WRF, где также усреднение производится по 60 минутам (красная линия).

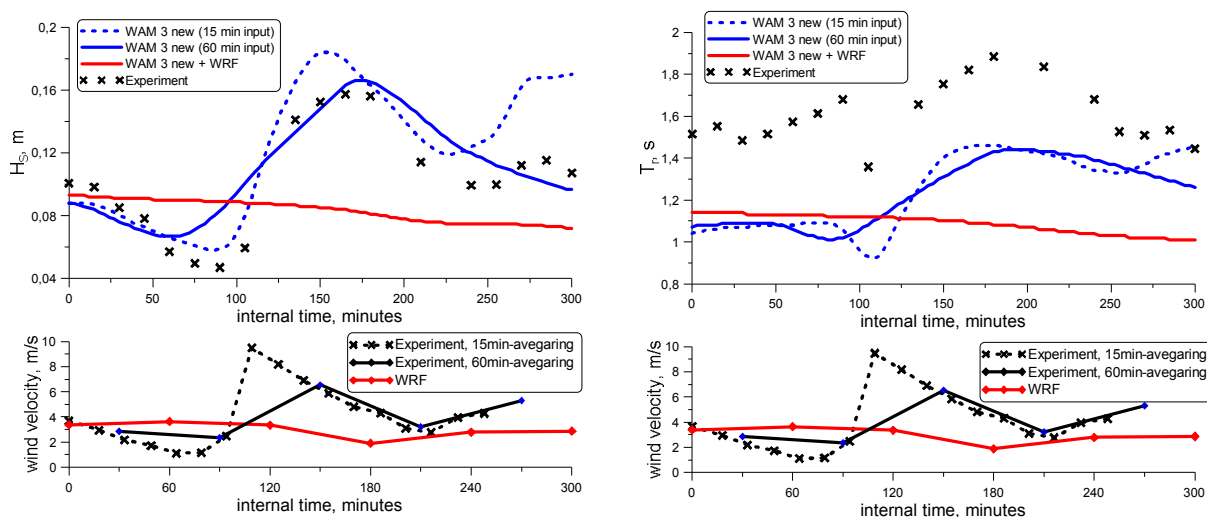


Рис. 42. Нижние графики: ветер, измеренный в эксперименте и усредненный за 15 минут (пунктирная черная линия), ветер, измеренный в эксперименте и усредненный за 60 минут (сплошная черная линия), данные о ветре из WRF, усредненные за 60 минут (красная линия). Верхние графики: а) H_s и б) T_m для: адаптированная к коротким разгонам WAM 3 с новым заданием ветра из эксперимента, усредненным за 15 минут (пунктирная синяя линия); адаптированная к коротким разгонам WAM 3 с заданием ветра из эксперимента, усредненным за 60 минут (сплошная синяя линия); адаптированная к коротким разгонам WAM 3 с заданием ветра из WRF (сплошная красная линия).

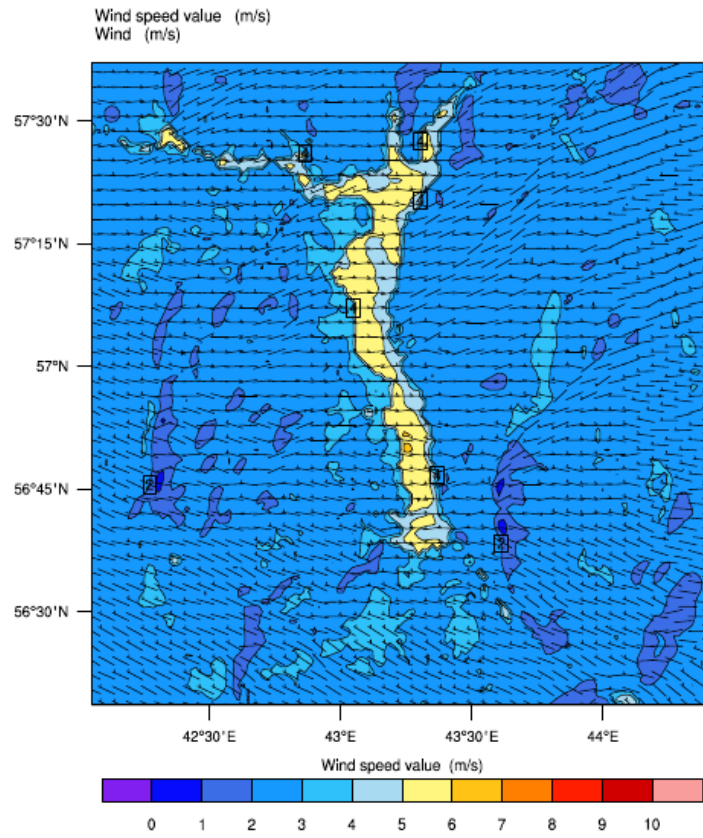
Из Рис. 42 видно, что переход от осреднения значений ветра из экспериментальных данных по 15 минутам к осреднению по 60 минутам, безусловно, влияет на зависимость ветра от времени, но в среднем ветер, задаваемый из эксперимента лежит выше значений

ветра, задаваемых из модели WRF. Кроме того, модель WRF не отражает локальных возрастаний значений скорости. Вследствие этого, результирующая зависимость $H_S(t)$ при задании ветровой накачки из WRF лежит в среднем ниже таковой с заданием ветра из эксперимента и также не отслеживает пиков. Периоды волнения рассчитаны в модели WW3 с оригинальными (не оптимизированными) параметрами нелинейности DIA, поэтому как для случая задания накачки ветром из эксперимента, так и для случая задания ветра из модели WRF получено удовлетворительное соответствие, однако оно может быть улучшено за счет применения оптимизированных параметров DIA.

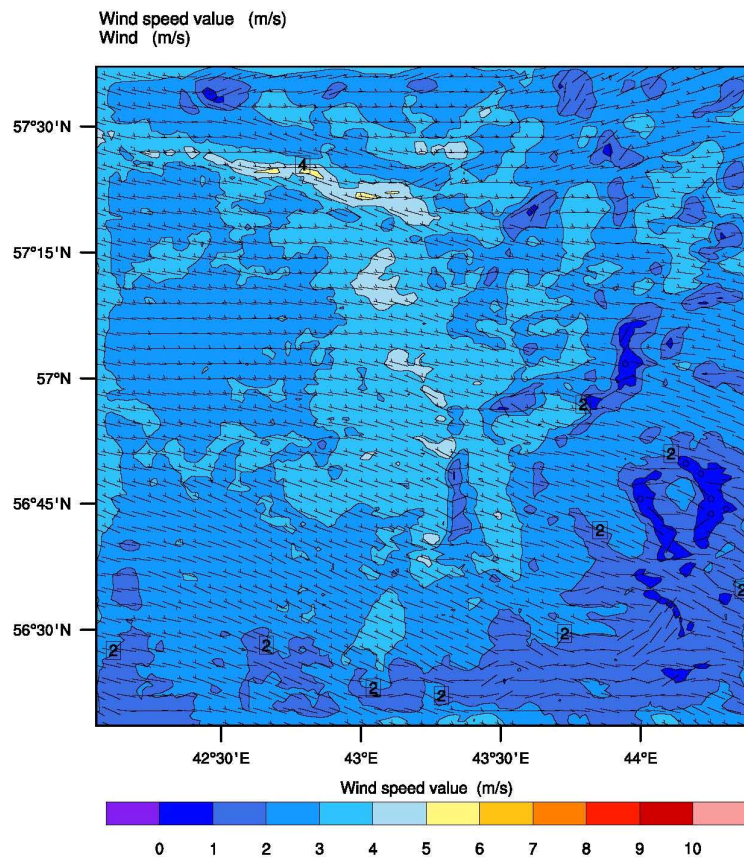
Качественные улучшения были получены при использовании обновленной версии модели WRF. В WRF v.3.9.1.1 имеется ряд обновлений, которые влияют на результаты моделирования в условиях области, содержащей внутренний водоем. Среди них наиболее важными являются использование новых топографических данных MODIS для подстилающей поверхности с новым способом учета категории озер, улучшения качества данных входного реанализа и метода интерполяции. Эти решения помогли сделать более точные прогнозы параметров ветра.

На Рис. 43 показаны рассчитанные прогнозы распределения скорости ветра на стандартной метеорологической высоте 10 м, полученные в новой версии модели WRF v.3.9.1.1 для тестового дня 08.08.2017. Новая версия модели позволила добиться лучшей пространственной и временной изменчивости по сравнению с описанным выше применением WRF v3.6 как по скорости ветра, так и по направлению. Полученные значения скорости ветра над поверхностью воды выше аналогичных значений над сушей, 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.

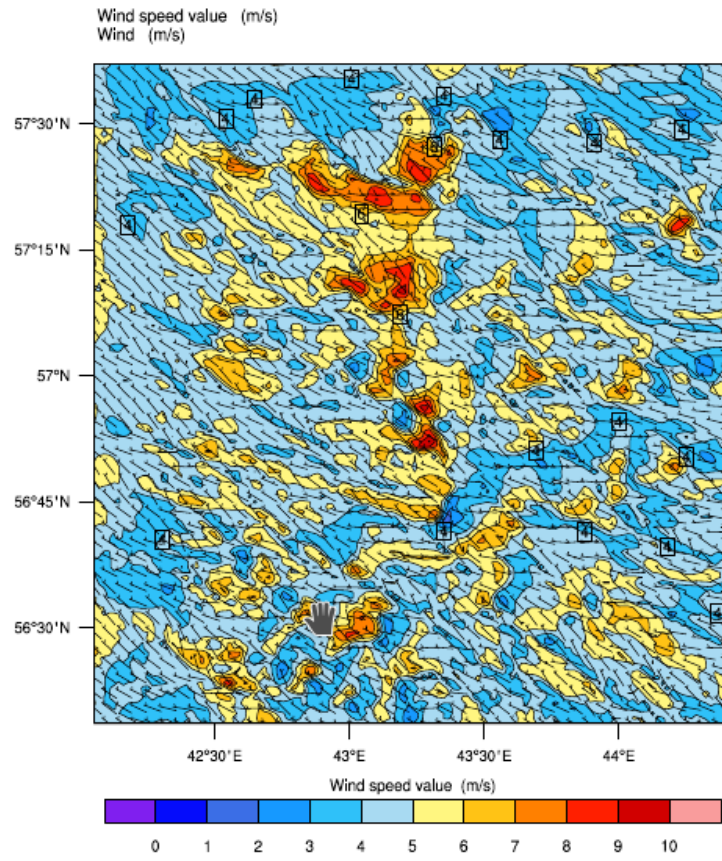
Аналогичные расчеты приведены для дня тестовых измерений 20.06.2017 (Рис. 44).



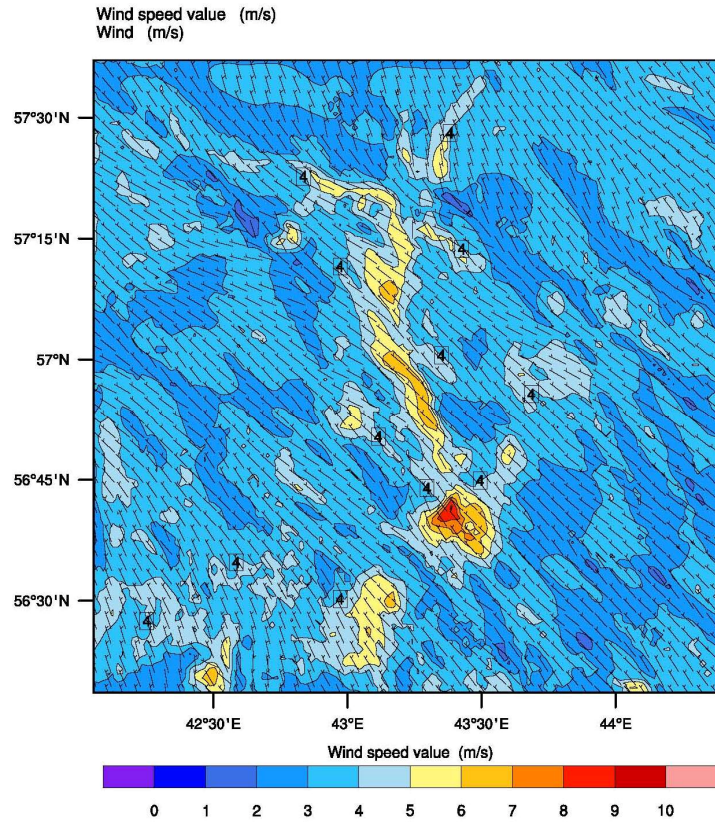
(a)



(b)

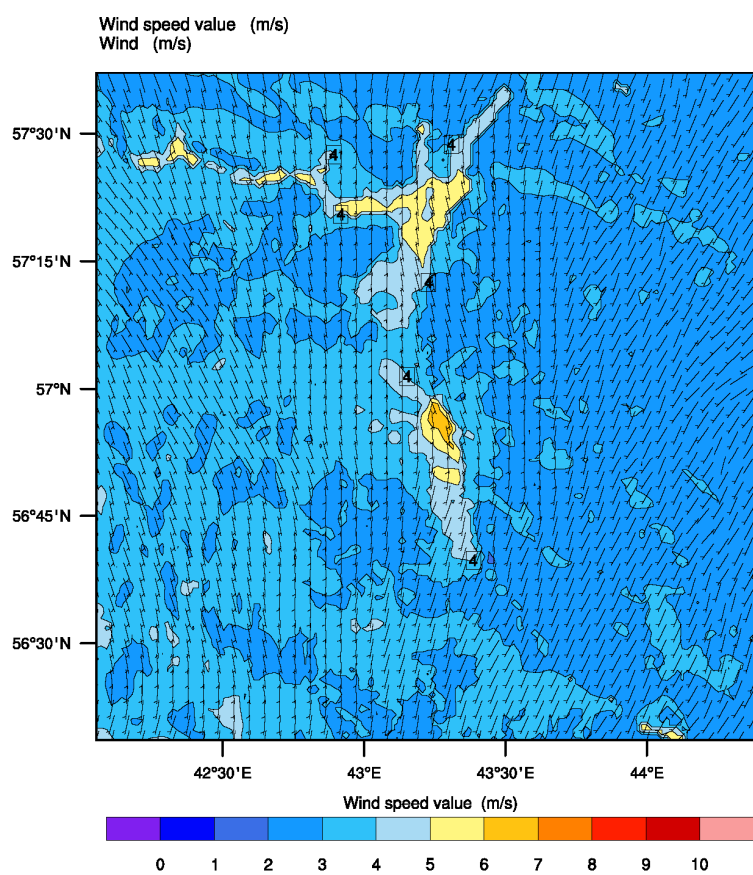


(B)

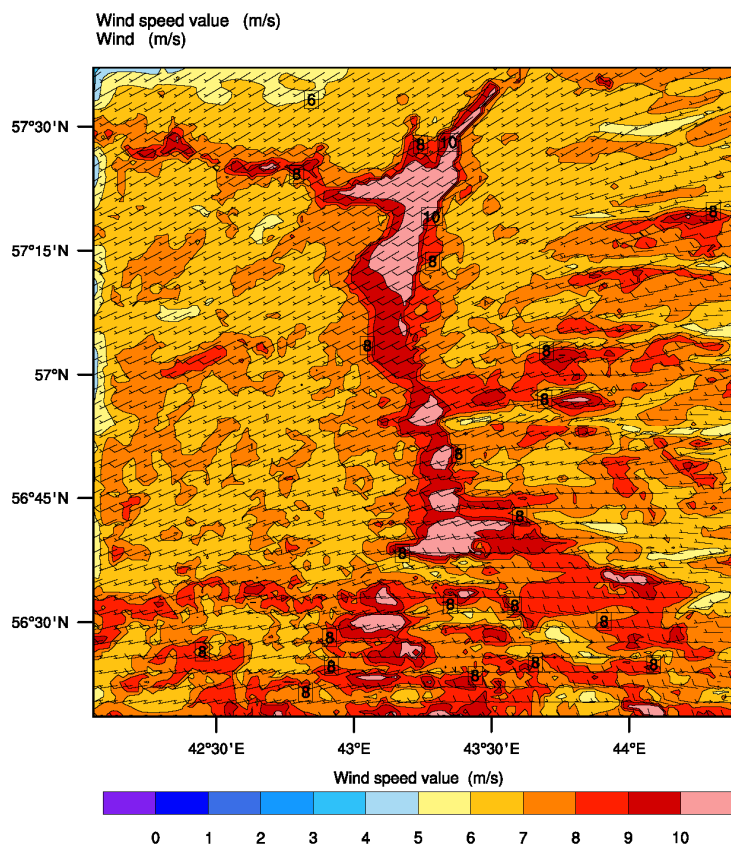


(Gamma)

Рис. 43. Распределение модуля и направления (обозначено векторами) скорости ветра над акваторией Горьковского водохранилища для тестового дня 08.08.17 в разные моменты времени.



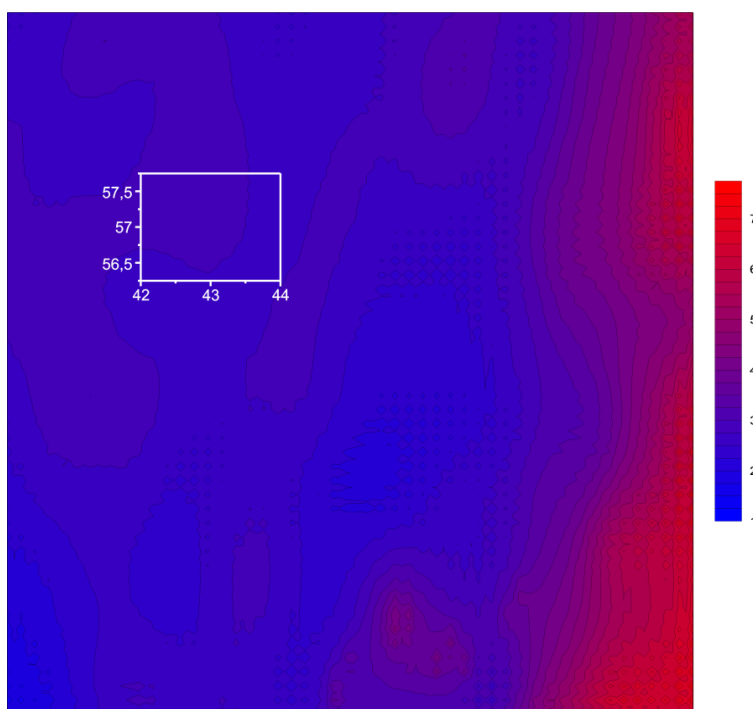
(a)



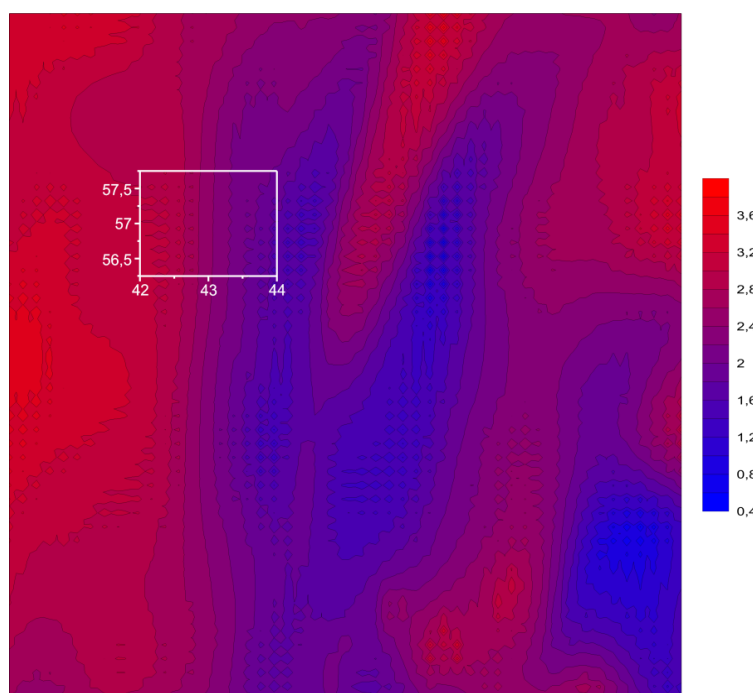
(б)

Рис. 44. Распределение модуля и направления (обозначено векторами) скорости ветра над акваторией Горьковского водохранилища для тестового дня 20.06.17 в разные моменты времени.

Для сравнения приведем данные о скорости ветра из данных реанализа CFSv2 в аналогичные моменты времени, соответствующие моментам времени на Рис.43 а, в (см. Рис.43 а, б). Видно, что данные реанализа демонстрируют гораздо меньшую пространственную изменчивость и не отображают увеличение скорости ветра над акваторией водохранилища. Область, содержащая Горьковское водохранилище и представленная на Рис. 45, выделена белым квадратом



(a)



(б)

Рис. 45. Распределение модуля скорости ветра над акваторией Горьковского водохранилища для тестового дня 08.08.17 по данным реанализа: (а) момент времени, приведенный на Рис. 43 а, (б) момент времени, приведенный на Рис. 43 в. Белым квадратом выделена область, содержащая Горьковское водохранилище и представленная на Рис. 43.

В рамках модели WRF v.3.9.1 были протестированы некоторые параметризации планетарного пограничного слоя (ППС) и приповерхностного слоя атмосферы. Среди них были опция 1_1 – теория подобия MM5 Yonsei University Scheme (YSU) [112], опция 2_2 – теория подобия Eta Mellor-Yamada-Janic Scheme (MYJ) [113], опция 5_5 – теория подобия Мони́на-Обухова в форме Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN) [114], основанные на подходе Рейнольдса к решению уравнений гидротермодинамики атмосферы, и метод крупных вихрей Large Eddy Simulation (LES) [115, 116].

Схема теории подобия MM5 использует функции устойчивости, описанные в [117-119] для вычисления коэффициентов обмена тепла, влаги и импульса. Поверхностные потоки тепла и влаги усиливаются под действием конвективной скорости в форме [120]. Длина шероховатости связана со скоростью трения над водой через соотношение Чарнока.

Схема теории подобия Eta [121] основана на теории подобия Мони́на - Обухова [122]. Схема включает параметризацию вязкого подслоя. Над водной поверхностью вязкий подслой параметризуется явно [121]. На суше влияние вязкого подслоя учитывается с помощью переменной высоты шероховатости для температуры и влажности, предложенной Зилитинкевичем [123]. Для того, чтобы избежать особенностей (сингулярности) в случае неустойчивой стратификации и затихающей скорости ветра, применяется поправка Белджара [120]. Поверхностные потоки вычисляются с помощью итерационного метода.

Опция LES, то есть метод крупных вихрей позволяла вычислять первые три домена в рамках схемы Университета Йонсей (YSU) для ППС и в рамках схемы поверхностного слоя, основанной на теории подобия Мони́на-Обухова, с учетом вязкой формы подуровня Карлсона-Боланда [124]. Моделирование скорости ветра в четвертом домене проводилось в том числе в планетарном пограничном слое, а для приповерхностного слоя использовалась параметризация Мони́на-Обухова.

Результаты сравнивались с измерениями in-situ, проведенными нашей группой в тестовые дни в 2016 и 2017 годах. Сравнение поведения скорости и направления ветра на стандартной метеорологической высоте 10 м, рассчитанных при подключении различных параметризаций, показано на Рис. 46. Результаты расчета WRF приведены для тестового дня 08.08.17. Прежде всего, проведено сравнение использования WRF с данными реанализа CFSv2 самой высокой точности 0,205⁰, доступной на сегодняшний день. 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 вихререзающего моделирования. Все примененные параметризации WRF показали хорошую временную изменчивость, отвечающую in-situ наблюдениям, как для модуля скорости (Рис. 46 а), так и для ее направления (Рис. 46 б). Для дальнейшего применения был выбран метод крупных вихрей, поскольку временная изменчивость, разброс данных по амплитуде прогнозируемого ветра наилучшим образом согласовывался в данными измерений in-situ при подключении данного пакета LES.

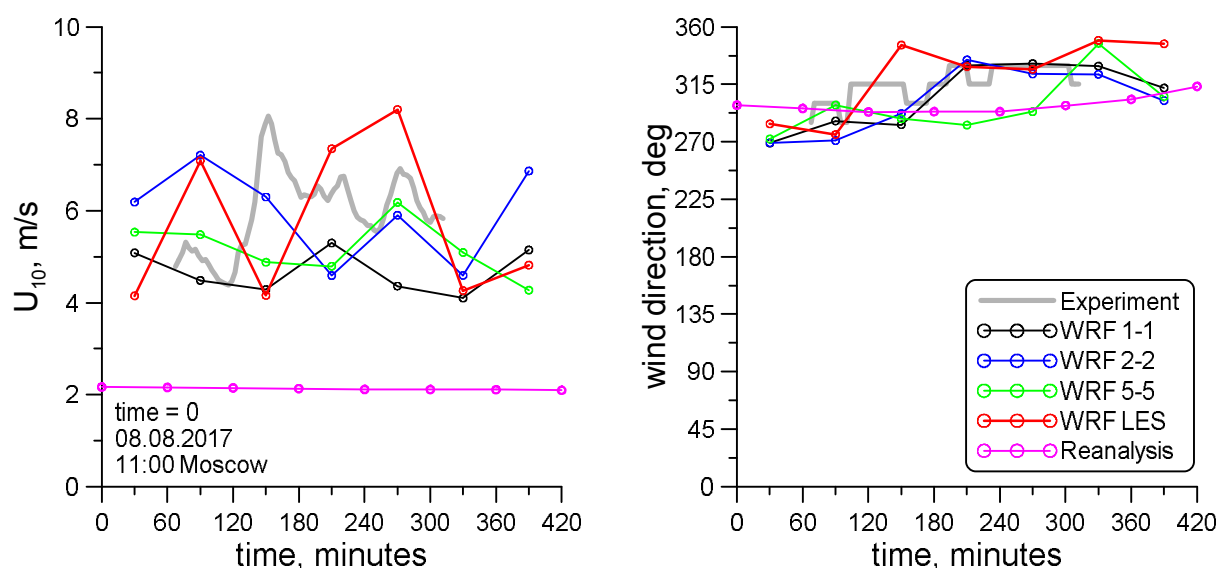


Рис. 46. Результаты расчета моделью WRF модуля скорости ветра (слева) и направления ветра (справа) с подключением разных параметризаций ППС и приповерхностного слоя атмосферы: 1_1 – MM5 similarity, 2_2 – Eta similarity, 5_5 – MYNN для Nakanishi & Niino, WRF LES в сравнении с данными измерений in-situ в тестовый день 08.08.2017.

4.6. Объединение моделей (1-way coupling)

Таким образом, мы показали, что в рамках модели WRF подход, связанный с применением метода крупных вихрей в планетарном пограничном слое повышает точность прогноза скорости ветра по сравнению с подходом, связанным с решением уравнений Рейнольдса, при этом для обоих подходов полученные данные о скорости ветра значительно лучше соответствуют данным in-situ по сравнению с данными реанализа. В свою очередь, можно ожидать, что увеличение точности задания входного ветра в волновую модель повысит точность предсказания параметров волнения по сравнению с использованием, например, данных реанализа. Было 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 последующее использование полученного расчетного поля ветра на стандартной метеорологической высоте U_{10} в качестве входных данных для модели WW3. Ключевым результатом стало внедрение ветровой накачки из атмосферной модели WRF в волновую модель WW3. В рамках современной атмосферной модели WRF были получены прогнозы состояния атмосферы высокого пространственного разрешения, что позволило получить данные расчета параметров волн высокого разрешения с учетом неоднородности поля ветра и топографии ландшафта. Верификация поля ветра, вычисленного в WRF, и средних параметров волнения, вычисленных в адаптированной WW3 с помощью WRF, производилась на основе экспериментальных данных. Расчетные значения значительных высот волн и средние периоды волн сравнивались с измеренными в натурном эксперименте.

Показано, что применение накачки ветром при помощи WRF LES при моделировании волнения в WW3 обеспечивает высокую пространственную изменчивость (Рис. 47 а) по сравнению с применением данных реанализа (Рис. 47 б).

Также проведено сравнение расчетных данных (при накачке ветром WRF LES и с использованием данных реанализа CFSv2) с экспериментальными в точке, соответствующей точке наблюдений (Рис. 48). 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.

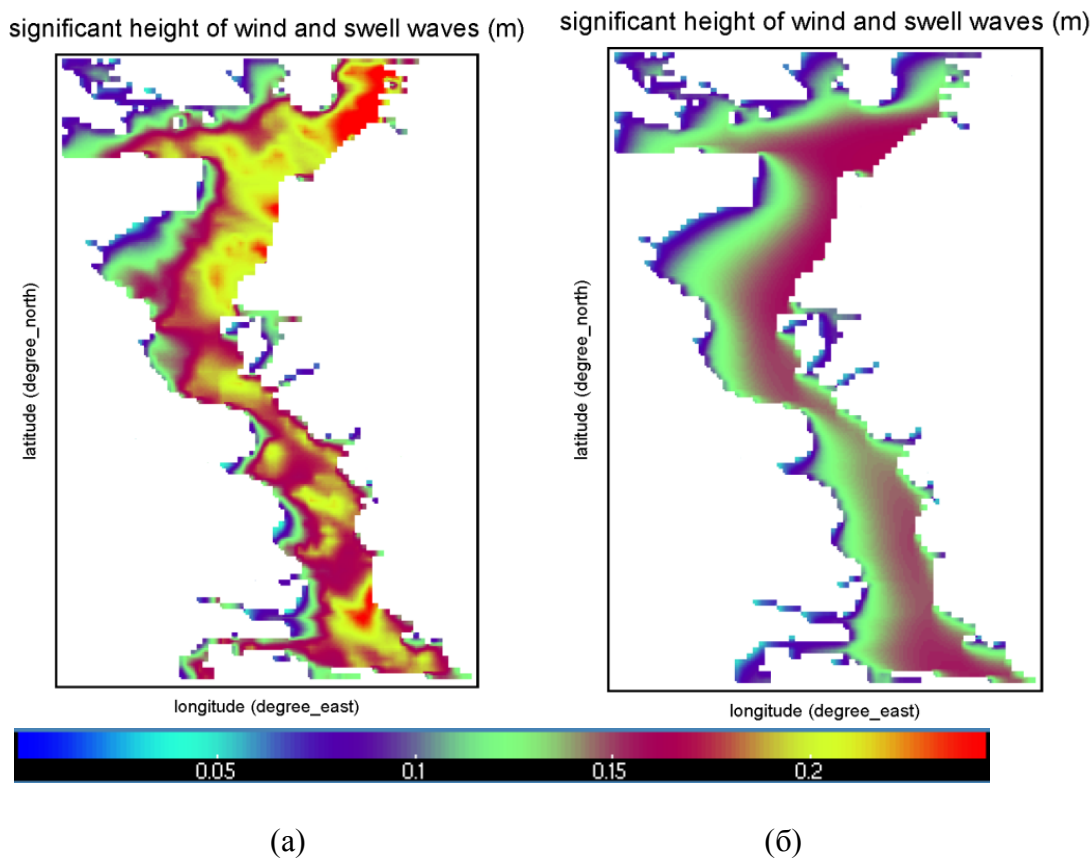


Рис. 47. Распределение значительной высоты волнения на Горьковском водохранилище для тестового дня 08.08.17 а) накачка ветром при помощи WRF LES, б) накачка ветром при помощи реанализа CFSv2.

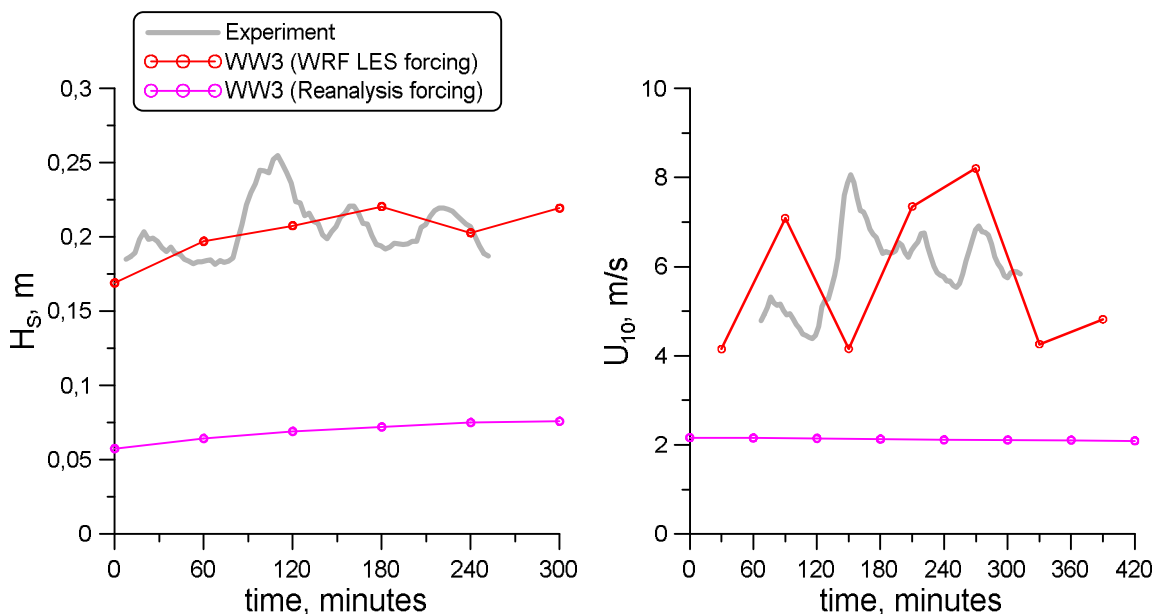


Рис. 48. Значительная высота волнения (слева), рассчитанная в модели WW3 с использованием накачки ветром (справа) WRF LES (красным цветом) и с использованием данных реанализа CFSv2 (розовым цветом), и экспериментальные данные (серым цветом) для тестового дня 08.08.17.

4.7. Заключение

Задание скорости ветра однородной над всей акваторией водохранилища с учетом временной изменчивости, задаваемой из эксперимента, даёт довольно хорошее согласие с экспериментом, однако недостаточно точно описывает случаи сильно неоднородного ветра. Кроме того, в практическом предсказании ветра и волнения необходимо пользоваться численными моделями. Учет пространственной изменчивости был реализован при помощи модели WRF.

Качественные улучшения были получены при использовании обновленной версии модели WRF v.3.9.1.1. Получено увеличение точности прогноза значения скорости ветра над поверхностью воды при использовании уравнений Рейнольдса примерно в 2 раза по сравнению с использованием данных реанализа.

Модель WRF была применена к области, содержащей внутренний водоем среднего размера, в качестве тестовой области была выбрана область, содержащая Горьковское водохранилище. Моделирование WRF проводилось для 4 вложенных доменов с минимальным размером ячейки 1 км. Входным параметром был реанализ CFSv2. Были проанализированы различные параметризации поверхностного слоя и параметризация параметров планетарного пограничного слоя в рамках WRF: теория подобия MM5 в форме Yonsei University Scheme (YSU), теория подобия Eta в форме Mellor-Yamada-Janic Scheme (MYJ), теория подобия Мони́на-Обухова в форме Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN) и метод крупных вихрей Large Eddy Simulation (LES). Результаты сравнивались с результатами измерений in-situ. Метод LES был выбран для дальнейшего моделирования. Показано, что увеличение детальности моделирования при использовании метода крупных вихрей повышает точность прогноза скорости ветра примерно в 3 раза по сравнению с использованием данных реанализа.

Было 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 последующее использование полученного расчетного поля ветра на стандартной метеорологической высоте U10 в качестве входных данных для модели WW3. Ключевым результатом стало внедрение ветровой накачки из атмосферной модели WRF в волновую модель WW3. Показано, что использование объединенной модели WRF-WW3 для прогноза волнения повышает точность моделирования в сравнении с применением данных реанализа в 3 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы 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 измерений *in-situ* на полигоне Горьковского водохранилища показано, что в условиях коротких разгонов предложенная адаптация модели WAVEWATCH III точнее вычисляет количество 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 подход, связанный с применением метода крупных вихрей в планетарном пограничном слое повышает точность прогноза скорости ветра по сравнению с подходом, связанным с решением уравнений Рейнольдса, при этом для обоих подходов полученные данные о скорости ветра значительно лучше соответствуют данным *in-situ* по сравнению с данными реанализа.
4. Для внутреннего водоема впервые предложена комбинированная система анализа ветра и волнения, полученная при объединении волновой и атмосферной моделей. На примере данных *in-situ* 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 скорости ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Энергетический цикл ветровых волн на поверхности океана / Г. Г. С. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. - 2010. - Т. 46. - №1. - С. 10–18.
- [2] Wave modelling – The state of the art / L. Cavaleri, J. H. G. M. Alves, F. Ardhuin, A. Babanin, M. Banner, K. Belibassakis, M. Benoit, M. Donelan, J. Groeneweg, T. H. C. Herbers, P. Hwang, P. A. E. M. Janssen, T. Janssen, I. V. Lavrenov, R. Magne, J. Monbaliu, M. Onorato, V. Polnikov, D. Resio, W. E. Rogers, A. Sheremet, J. McKee Smith, H. L. Tolman, G. van Vledder, J. Wolf, I. Young // *Progress in Oceanography*. - 2007. - Т. 75. - №4. - С. 603-674.
- [3] Progress in ocean wave forecasting / P. A. E. M. Janssen // *Journal of Computational Physics*. - 2008. - Т. 227. - №7. - С. 3572-3594.
- [4] User manual and system documentation of WAVEWATCH III (R) version 5.16. - 2016.
- [5] SWAN – user manual. / University of Technology, Environmental Fluid Mechanics Section, - 2006. -129 p.
- [6] The WAM model cycle 4. /Gunter, S.Hasselmann, P.Jansen // Technical report No. 4. - 1992. - 101 p.
- [7] A Description of the Advanced Research WRF Version 3 / W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, J. G. Powers // NCAR TECHNICAL NOTE. - 2008. - №NCAR/TN–475+STR. - С. 113 pp.
- [8] R. G. Owens, H. Tim, "ECMWF Forecast User Guide," ed. Reading: ECMWF, 2018.
- [9] On the developments of spectral wave models: numerics and parameterizations for the coastal ocean / A. Roland, F. Ardhuin // *Ocean Dynamics*. - 2014. - Т. 64. - №6. - С. 833-846.
- [10] J. MICHALAKES, J. DUDHIA, D. GILL, T. HENDERSON, J. KLEMP, W. SKAMAROCK, W. WANG, "THE WEATHER RESEARCH AND FORECAST MODEL: SOFTWARE ARCHITECTURE AND PERFORMANCE," in *Use of High Performance Computing in Meteorology*, ed, pp. 156-168.
- [11] Моделирование влияния гидродинамических и антропогенных факторов на распределение гидробионтов в водохранилищах: Руководство для пользователей / С. Поддубный, Э. Сухова // Рыбинск: Изд-во ОАО «Рыбинский дом печати. - 2002.
- [12] <http://www.lakeeriewx.com/Guidance/Resources.html>
- [13] Lake Michigan storm: Wave and water level modeling. / R.E.Jensen. M.A.Cialone, R.S.Chapman, B.A.Ebersole, M.Anderson, L.Thomas //- 2012.
- [14] Lake St. Clair: Storm wave and water level modeling./ T.J.Hesser, M.A.Cialone, M.E.Anderson // - 2013.
- [15] <https://www.weather.gov/greatlakes/>
- [16] On the Dependence of Sea Surface Roughness on Wave Development / M. A. Donelan, F. W. Dobson, S. D. Smith, R. J. Anderson // *Journal of Physical Oceanography*. - 1993. - Т. 23. - №9. - С. 2143-2149.
- [17] Sea state forecasting. The spectral method (In French) / R. Gelci, H. Cazalé, J. Vassal // *Bulletin d'information du Comité d'Océanographie et d'Etude des Côtes*. - 1957. - Т. 9. - С. 416-435.
- [18] Состояние и перспективы исследования морского волнения / Ю. М. Крылов // Труды Океанографической комиссии АН СССР, - 1961. - 3-6.
- [19] Empirical and theoretical relations between wind, sea, and swell / H. U. Sverdrup, W. H. Munk // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. - 1946. - Т. 27. - №6. - С. 823-827.
- [20] Wind, sea and swell. Theory of relations for forecasting / H. U. Sverdrup // *US Navy Hydrog. Office, Pub.* - 1947. - Т. 601. - С. 44.
- [21] Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics. - 1971.
- [22] Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy / M. S. Longuet-Higgins // *Ocean wave spectra*. - 1961.
- [23] Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves / Philips, O.M. // *Journal of Fluid Mechanics* - Т. 156. - С. 505-531.
- [24] On the generation of surface waves by shear flows / J. W. Miles // *Journal of Fluid Mechanics*. - 1957. - Т. 3. - С. 185 – 204.

- [25] On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum Part 1. General theory / K. Hasselmann // *Journal of Fluid Mechanics*. - 1962. - Т. 12. - №4. - С. 481-500.
- [26] Validation of a thirty year wave hindcast using the Climate Forecast System Reanalysis winds / A. Chawla, D. M. Spindler, H. L. Tolman // *Ocean Modelling*. - 2013. - Т. 70. - С. 189-206.
- [27] A global high-resolution ocean wave model improved by assimilating the satellite altimeter significant wave height / H. Yu, J. Li, K. Wu, Z. Wang, H. Yu, S. Zhang, Y. Hou, R. M. Kelly // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. - 2018. - Т. 70. - С. 43-50.
- [28] A revised formulation of ocean wave dissipation and its model impact. / J.-R. Bidlot, P. Janssen, A. Saleh // *ECMWF Technical Memorandum* - 2007.
- [29] THE "SWAN" WAVE MODEL FOR SHALLOW WATER / L. H. H. N. Booij, R. C. Ris // *Coastal Engineering Proceedings*. - 1996. - Т. 25.
- [30] <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>
- [31] К теории прогноза ветровых волн / В. Е. Захаров, М. М. Заславский // *Доклады АН СССР*. - 1982. - Т. 265. - №3. - С. 567-571.
- [32] Е. С. Н. З. К. Абузяров, "СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСПЕШНОСТИ ПРОГНОЗОВ ВОЛНЕНИЯ ПО ОТЕЧЕСТВЕННЫМ ВОЛНОВЫМ МОДЕЛЯМ AARI-PD2 И РАВМ," in *ТРУДЫ ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»*. vol. 343, Ф. с. п. г. и. м. о. среды, Ed., ed Обнинск: «ИГ-СОЦИН», 2009.
- [33] Форма спектра энергонесущих компонент водной поверхности в слаботурбулентной теории ветровых волн / В. Захаров, М. Заславский // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. - 1983. - Т. 19. - №3. - С. 282-291.
- [34] Observation-Based Source Terms in the Third-Generation Wave Model WAVEWATCH III: Updates and Verification / Q. Liu, W. E. Rogers, A. V. Babanin, I. R. Young, L. Romero, S. Zieger, F. Qiao, C. Guan // *Journal of Physical Oceanography*. - 2018. - Т. 49. - №2. - С. 489-517.
- [35] Performance of WAVEWATCH-III and SWAN Models in the North Sea / S. Ponce de León, J. Bettencourt, G. P. Van Vledder, P. Doohan, C. Higgins, C. Guedes Soares, F. Dias. - 2018. - №51333. - С. V11BT12A052.
- [36] WAVEWATCH III –WRF high-resolution wind wave hindcast in the North Atlantic: wave model configuration and preliminary results for 1979-2000 / M. Markina, A. Gavrikov, S. Gulev // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. - 2019. - Т. 231. - С. 012035.
- [37] Об узконаправленном приближении кинетического уравнения для спектра ветровых волн / М. Заславский // *Изв. АН СССР. Физ. атм. и океана*. - 1989. - Т. 25. - №4. - С. 402.
- [38] Role of non-resonant interactions in the evolution of nonlinear random water wave fields / S. Y. Annenkov, V. I. Shrira // *Journal of Fluid Mechanics*. - 2006. - Т. 561. - С. 181-207.
- [39] S. Saha, S. Moorthi, X. Wu, J. Wang, S. Nadiga, P. Tripp, D. Behringer, Y.-T. Hou, H.-y. Chuang, M. Iredell, M. Ek, J. Meng, R. Yang, M. P. Mendez, H. van den Dool, Q. Zhang, W. Wang, M. Chen, E. Becker, "NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products," ed. Boulder, CO: Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, 2011.
- [40] Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain / C. Bollmeyer, J. D. Keller, C. Ohlwein, S. Wahl, S. Crewell, P. Friederichs, A. Hense, J. Keune, S. Kniefel, I. Pscheidt, S. Redl, S. Steinke // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. - 2015. - Т. 141. - №686. - С. 1-15.
- [41] A fully coupled atmosphere–ocean wave modeling system for the Mediterranean Sea: interactions and sensitivity to the resolved scales and mechanisms / P. Katsafados, A. Papadopoulos, G. Korres, G. Varlas // *Geosci. Model Dev*. - 2016. - Т. 9. - №1. - С. 161-173.
- [42] Dynamics and modelling of ocean waves / G. Komen, L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, P. Janssen // *Cambridge University Press, UK* -1994- Т. 554. - С. 1271-1285.
- [43] An operational wave forecasting system for the Portuguese continental coastal area / C. Guedes Soares, L. Rusu, M. Bernardino, P. Pilar // *Journal of Operational Oceanography*. - 2011. - Т. 4. - №2. - С. 17-27.

- [44] A hurricane morphology and sea surface wind vector estimation model based on C-band cross-polarization SAR imagery / G. Zhang, W. Perrie, X. Li, J. A. Zhang // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. - 2017. - T. 55. - №3. - C. 1743-1751.
- [45] Performance evaluation of Wavewatch III in the Mediterranean Sea / L. Mentaschi, G. Besio, F. Cassola, A. Mazzino // *Ocean Modelling*. - 2015. - T. 90. - C. 82-94.
- [46] Wave hindcast statistics in the seasonally ice-covered Baltic Sea / L. Tuomi, K. K. Kahma, H. Pettersson. - 2011.
- [47] Accuracy of the modelled wind and wave fields in enclosed seas / L. Cavaleri, L. Bertotti // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. - 2004. - T. 56. - №2. - C. 167-175.
- [48] Wind and wave predictions in the Adriatic Sea / L. Bertotti, L. Cavaleri // *Journal of Marine Systems*. - 2009. - T. 78. - C. S227-S234.
- [49] Wave energy balance in wave models (SWAN) for semi-enclosed domains—application to the Catalan coast / E. Pallares, A. Sánchez-Arcilla, M. Espino // *Continental Shelf Research*. - 2014. - T. 87. - C. 41-53.
- [50] Evaluation of the numerical wave model (SWAN) for wave simulation in the Black Sea / A. Akpınar, G. P. van Vledder, M. İ. Kömürçü, M. Özger // *Continental Shelf Research*. - 2012. - T. 50. - C. 80-99.
- [51] Wave power atlas of eastern mediterranean and aegean seas / B. Ayat // *Energy*. - 2013. - T. 54. - C. 251-262.
- [52] An evaluation of a high-resolution operational wave forecasting system in the Adriatic Sea / J. D. Dykes, D. W. Wang, J. W. Book // *Journal of Marine Systems*. - 2009. - T. 78. - C. S255-S271.
- [53] Development of a nested local scale wave model for a 1/4 scale wave energy test site using SWAN / R. Atan, S. Nash, J. Goggins // *Journal of Operational Oceanography*. - 2017. - T. 10. - №1. - C. 59-78.
- [54] Comparison between nested grids and unstructured grids for a high-resolution wave forecasting system in the western Mediterranean sea / E. Pallares, J. Lopez, M. Espino, A. Sánchez-Arcilla // *Journal of Operational Oceanography*. - 2017. - T. 10. - №1. - C. 45-58.
- [55] Wind Stress and Surface Waves Observed on Lake Washington / K. K. B. Atakturk S.S. // *Journal of Physical Oceanography*. - 1999. - №29. - C. 633-650.
- [56] Effects of wind trend and gustiness on the sea drag: Lake George study / M. V. K. Babanin A.V. // *Journal of Geophysical Research*. - 2008. - T. 113.
- [57] Моделирование влияния гидродинамических и антропогенных факторов на распределение гидробионтов в водохранилищах: руководство для пользователей / S. Poddubnyi, E. Sukhova // *Rybinsk, Rybinskii Dom pečati*. - 2002.
- [58] Определение характеристик волнового режима Братского водохранилища / E. Н. Сутырина // *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле*. - 2011. - T. 4. - №2.
- [59] The great lakes wave model at NOAA/NCEP: challenges and future developments / J.-H. G. Alves, A. Chawla, H. L. Tolman, D. J. Schwab, G. Lang, G. Mann // *12th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Hawaii*, - 2011. -.
- [60] Hindcasting of wind and wave climate of seas around Russia / L. J. Lopatoukhin, A. V. Boukhanovsky, E. S. Chernysheva, S. V. Ivanov // *8th Int. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting. November*, - 2004. - 14-19.
- [61] Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) / K. Hasselmann, T. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. Cartwright, K. Enke, J. Ewing, H. Gienapp, D. Hasselmann, P. Kruseman // *Ergänzungsheft 8-12*. - 1973.
- [62] Adjusting of Wind Input Source Term in WAVEWATCH III Model for the Middle-Sized Water Body on the Basis of the Field Experiment / A. Kuznetsova, G. Baydakov, V. Papko, A. Kandaurov, M. Vdovin, D. Sergeev, Y. Troitskaya // *Advances in Meteorology*. - 2016. - T. 2016. - C. 13.
- [63] On domination of nonlinear wave interaction in the energy balance of wind-driven sea / V. E. Zakharov // *Физика низких температур*. - 2010.

- [64] Remarks on the definition and estimation of friction velocity / R. O. Weber // *Boundary Layer Meteorology*. - 1999. - T. 93. - C. 197–209.
- [65] Inertial-dissipation methods and turbulent fluxes at the air-ocean interface / S. E. Fairall C. W. and Larsen // *Boundary Layer Meteorology*. - 1986. - T. 34. - C. 287–301.
- [66] MICROMETEOROLOGY / G. Sutton // *Scientific American*. - 1964. - T. 211. - №4. - C. 62-77.
- [67] User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 3.14 / H. L. Tolman // *Technical note, MMAB Contribution*. - 2009. - T. 276. - C. 220.
- [68] Array measurement of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves / F. W. D. R. L. Snyder, J. A. Elliott, R. B. Long // *Journal of Fluid Mechanics*. - 1981. - T. 102. - C. 1 - 59.
- [69] Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane / J. Wu // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. - 1982. - T. 87. - №C12. - C. 9704-9706.
- [70] On the Existence of a Fully Developed Wind-Sea Spectrum / G. J. Komen, K. Hasselmann // *Journal of Physical Oceanography*. - 1984. - T. 14. - №8. - C. 1271-1285.
- [71] Source Terms in a Third-Generation Wind Wave Model / H. L. Tolman, D. Chalikov // *Journal of Physical Oceanography*. - 1996. - T. 26. - №11. - C. 2497-2518.
- [72] *The Interaction of Ocean Waves and Wind* / P. A. E. M. Janssen -: Cambridge University Press, 2004.
- [73] Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting / P. A. Janssen // *Journal of Physical Oceanography*. - 1991. - T. 21. - №11. - C. 1631-1642.
- [74] 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 / S. Hasselmann, K. Hasselmann // *Journal of Physical Oceanography*. - 1985. - T. 15. - №11. - C. 1369-1377.
- [75] 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 / S. Hasselmann, K. Hasselmann, J. H. Allender, T. P. Barnett // *Journal of Physical Oceanography*. - 1985. - T. 15. - №11. - C. 1378-1391.
- [76] On the dynamics of unsteady gravity waves of finite amplitude Part 1. The elementary interactions / O. M. Phillips // *Journal of Fluid Mechanics*. - 1960. - T. 9. - №2. - C. 193-217.
- [77] Stability of periodic waves of finite amplitude on the surface of a deep fluid / V. E. Zakharov // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. - 1968. - T. 9. - №2. - C. 190–194.
- [78] EFFICIENT ALGORITHMS FOR COMPUTING NON-LINEAR FOUR-WAVE INTERACTIONS / G. P. v. Vledder // *ECMWF Workshop on Ocean Waves*, - 2012. - 97-112.
- [79] Extension and Modification of Discrete Interaction Approximation (DIA) for Computing Nonlinear Energy Transfer of Gravity Wave Spectra / N. Hashimoto, K. Kawaguchi // *Fourth International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis*, - 2001. - .
- [80] Non-linear transfers between sea waves / D. J. Webb // *Deep Sea Research*. - 1978. - T. 25. - №3. - C. 279-298.
- [81] Theory and calculation of the nonlinear energy transfer between sea waves in deep water. - 1982.
- [82] A numerical study of nonlinear energy fluxes due to wave-wave interactions Part 1. Methodology and basic results / D. Resio, W. Perrie // *Journal of Fluid Mechanics*. - 1991. - T. 223. - C. 603-629.
- [83] A genetic optimization package for the Generalized Multiple DIA in WAVEWATCH III R. Tech. - 2010.
- [84] A Two-Scale Approximation for Efficient Representation of Nonlinear Energy Transfers in a Wind Wave Spectrum. Part II: Application to Observed Wave Spectra / W. Perrie, D. T. Resio // *Journal of Physical Oceanography*. - 2009. - T. 39. - №10. - C. 2451-2476.
- [85] A two-scale approximation for wave–wave interactions in an operational wave model / W. Perrie, B. Toulany, D. T. Resio, A. Roland, J.-P. Auclair // *Ocean Modelling*. - 2013. - T. 70. - C. 38-51.

- [86] Wave-Follower Field Measurements of the Wind-Input Spectral Function. Part II: Parameterization of the Wind Input / M. A. Donelan, A. V. Babanin, I. R. Young, M. L. Banner // *Journal of Physical Oceanography*. - 2006. - T. 36. - №8. - C. 1672-1689.
- [87] Wave-Follower Field Measurements of the Wind-Input Spectral Function. Part III: Parameterization of the Wind-Input Enhancement due to Wave Breaking / A. V. Babanin, M. L. Banner, I. R. Young, M. A. Donelan // *Journal of Physical Oceanography*. - 2007. - T. 37. - №11. - C. 2764-2775.
- [88] A Note on the Ocean Surface Roughness Spectrum / P. A. Hwang // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. - 2011. - T. 28. - №3. - C. 436-443.
- [89] <http://hydroiap.ru/>
- [90] Cmems baltic monitoring and forecasting centre: High-resolution wave forecasts in the seasonally ice-covered baltic sea. / L. Tuomi, O. Vaha-Piikkio, T. Siili, and V. Alari // *Proceedings of 8th EuroGOOS conferences*, - 2017. -.
- [91] J.-V. Bjorkqvist, O. Vaha-Piikkio, V. Alari, A. Kuznetsov, L. Tuomia, "Title," unpublished].
- [92] Evidence of Energy and Momentum Flux from Swell to Wind / K. K. Kahma, M. A. Donelan, W. M. Drennan, E. A. Terray // *Journal of Physical Oceanography*. - 2016. - T. 46. - №7. - C. 2143-2156.
- [93] <http://greatsouthernroute.com/weather-routing/the-red-sea-and-persian-gulf-weather-conditions/>
- [94] Performance evaluation of WAVEWATCH III model in the Persian Gulf using different wind resources / M. H. Kazeminezhad, S. M. Siadatmousavi // *Ocean Dynamics*. - 2017. - T. 67. - №7. - C. 839-855.
- [95] Study of waves at different fetches using WAVEWATCH III modeling and precipitation radar data / A. Kuznetsova, M. Panfilova, Yu. Titchenko, G. Baydakov, Y. Troitskaya // *Proceedings of the IEEE*. - 2019.
- [96] M. V. Sivakumar, "Impacts of natural disasters in agriculture, rangeland and forestry: an overview," in *Natural disasters and extreme events in Agriculture*, ed: Springer, 2005, pp. 1-22.
- [97] Influence of upper ocean stratification interannual variability on tropical cyclones / E. M. Vincent, K. A. Emanuel, M. Lengaigne, J. Vialard, G. Madec // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. - 2014. - T. 6. - №3. - C. 680-699.
- [98] Evaluation of WAVEWATCH III Wave Model under Tropical Cyclone Conditions / J. Port, T. Hara, B. Reichl, I. Ginis // *American Geophysical Union, Ocean Sciences Meeting 2016*, abstract# A54C-2735, - 2016. -.
- [99] Numerical simulations of ocean surface waves under hurricane conditions: Assessment of existing model performance / Q. Liu, A. Babanin, Y. Fan, S. Zieger, C. Guan, I.-J. Moon // *Ocean Modelling*. - 2017. - T. 118. - C. 73-93.
- [100] Theory and application of calibration techniques for an NDBC directional wave measurements buoy / K. Steele, J. Lau, Y.-H. Hsu // *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. - 1985. - T. 10. - №4. - C. 382-396.
- [101] Fragmentation of the "bag-breakup" type as a mechanism of the generation of sea spray at strong and hurricane winds / Y. I. Troitskaya, O. Ermakova, A. Kandaurov, D. Kozlov, D. Sergeev, S. Zilitinkevich // *Doklady Earth Sciences*, - 2017. - 1330-1335.
- [102] Bag-breakup fragmentation as the dominant mechanism of sea-spray production in high winds / Y. Troitskaya, A. Kandaurov, O. Ermakova, D. Kozlov, D. Sergeev, S. Zilitinkevich // *Scientific reports*. - 2017. - T. 7. - №1. - C. 1614.
- [103] The "Bag Breakup" Spume Droplet Generation Mechanism at High Winds. Part II: Contribution to Momentum and Enthalpy Transfer / Y. Troitskaya, O. Druzhinin, D. Kozlov, S. Zilitinkevich // *Journal of Physical Oceanography*. - 2018. - T. 48. - №9. - C. 2189-2207.
- [104] New sea spray generation function for spume droplets / D. Zhao, Y. Toba, K. i. Sugioka, S. Komori // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. - 2006. - T. 111. - №C2.
- [105] Non-monotonous dependence of the ocean surface drag coefficient on the hurricane wind speed due to the fragmentation of the ocean-atmosphere interface / Y. I. Troitskaya, O.

- Ermakova, A. Kandaurov, D. Kozlov, D. Sergeev, S. Zilitinkevich // *Doklady Earth Sciences*, - 2017. - 1373-1378.
- [106] Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones / M. D. Powell, P. J. Vickery, T. A. Reinhold // *Nature*. - 2003. - T. 422. - №6929. - C. 279.
- [107] Wind and waves in extreme hurricanes / L. H. Holthuijsen, M. D. Powell, J. D. Pietrzak // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. - 2012. - T. 117. - №C9.
- [108] Bottom-up determination of air-sea momentum exchange under a major tropical cyclone / E. Jarosz, D. A. Mitchell, D. W. Wang, W. J. Teague // *Science*. - 2007. - T. 315. - №5819. - C. 1707-1709.
- [109] An assessment of the flux profile method for determining air-sea momentum and enthalpy fluxes from dropsonde data in tropical cyclones / D. H. Richter, R. Bohac, D. P. Stern // *Journal of the Atmospheric Sciences*. - 2016. - T. 73. - №7. - C. 2665-2682.
- [110] Wind and wave modelling in the Black Sea / L. Rusu, M. Bernardino, C. Guedes Soares // *Journal of Operational Oceanography*. - 2014. - T. 7. - №1. - C. 5-20.
- [111] The operational implementation of a Great Lakes wave forecasting system at NOAA/NCEP / J.-H. G. Alves, A. Chawla, H. L. Tolman, D. Schwab, G. Lang, G. Mann // *Weather and Forecasting*. - 2014. - T. 29. - №6. - C. 1473-1497.
- [112] A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes / S.-Y. Hong, Y. Noh, J. Dudhia // *Monthly weather review*. - 2006. - T. 134. - №9. - C. 2318-2341.
- [113] Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems / G. L. Mellor, T. Yamada // *Reviews of Geophysics*. - 1982. - T. 20. - №4. - C. 851-875.
- [114] Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer / M. Nakanishi, H. Niino // *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*. - 2009. - T. 87. - №5. - C. 895-912.
- [115] Examining two-way grid nesting for large eddy simulation of the PBL using the WRF model / C. Moeng, J. Dudhia, J. Klemp, P. Sullivan // *Monthly weather review*. - 2007. - T. 135. - №6. - C. 2295-2311.
- [116] Implementation of a nonlinear subfilter turbulence stress model for large-eddy simulation in the Advanced Research WRF model / J. Mirocha, J. Lundquist, B. Kosović // *Monthly weather review*. - 2010. - T. 138. - №11. - C. 4212-4228.
- [117] The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer / C. A. Paulson // *Journal of Applied Meteorology*. - 1970. - T. 9. - №6. - C. 857-861.
- [118] Flux-gradient relationships in the constant flux layer / A. Dyer, B. Hicks // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. - 1970. - T. 96. - №410. - C. 715-721.
- [119] Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability / E. K. Webb // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. - 1970. - T. 96. - №407. - C. 67-90.
- [120] The parametrization of surface fluxes in large-scale models under free convection / A. C. Beljaars // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. - 1995. - T. 121. - №522. - C. 255-270.
- [121] The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes / Z. I. Janjić // *Monthly weather review*. - 1994. - T. 122. - №5. - C. 927-945.
- [122] Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы / А. Монин, А. Обухов // *Тр. геофиз. Ин-та СССР*. - 1954. - №2. - C. 151.
- [123] Non-local turbulent transport: Pollution dispersion aspects of coherent structure of connective flows / S. Zilitinkevich // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. - 1970. - T. 9.
- [124] Analysis of urban-rural canopy using a surface heat flux/temperature model / T. N. Carlson, F. E. Boland // *Journal of Applied Meteorology*. - 1978. - T. 17. - №7. - C. 998-1013.

СПИСОК ТРУДОВ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Опубликованные статьи в реферируемых журналах

1. 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, vol. 1, article ID 574602, pp. 1-13.
2. 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, 2016.
3. 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*, Vol. 9, № 2, pp. 19 – 37, 2016, DOI: 10.15356/2071-9388_02v09_2016_02.
4. A Kuznetsova, G Baydakov, D Sergeev, Yu Troitskaya, 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*, Volume 955 (2018), 012014, 2018, doi :10.1088/1742-6596/955/1/012014.
5. G.A. Baydakov, A.M. Kuznetsova, V.V. Papko, A.A. Kandaurov, M.I. Vdovin, D.A. Sergeev, Yu.I. Troitskaya 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)*, p. 112-124, DOI: 10.1007/978-3-319-77788-7_13, 2018.
6. 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*. – № 3(17). – 2018. – С. 258-160.
7. 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*. – № 3(17). – 2018. – С. 193-194.
8. Alexandra Kuznetsova, Georgy Baydakov, Alexandr Dosaev, Daniil Sergeev and Yulia Troitskaya "Wind waves modeling under hurricane wind conditions" // *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, Volume 1163 (2019), 012054, 2019.
9. Alexandra Kuznetsova, Georgy Baydakov, Daniil Sergeev and Yuliya Troitskaya "High-resolution waves and weather forecasts using adapted WAVEWATCH III and WRF models" // *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, Volume 1163 (2019), 012031, 2019.

Публикации в трудах конференций

1. 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.
2. Байдаков Г.А., Н.А.Богатов, В.В.Папко, А.М.Кузнецова, Д.А.Сергеев, Ю.И.Троицкая. Натурное исследование особенностей ветро-волнового взаимодействия в условиях водохранилищ // *Труды всероссийской конференции "Гидрометеорология и*

экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития", г. Санкт-Петербург, 19-20 декабря 2017 г., 69-72.

3. 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.
4. Байдаков Г.А., Богатов Н.А., Вдовин М.И., Кандауров А.А., Кузнецова А.М., Папко В.В., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Натурные исследования особенностей ветро-волнового взаимодействия при малых разгонах на примере Горьковского водохранилища. // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва, 10-14 апреля 2017 г. [Электронный ресурс]. – Москва: ИО РАН, с. 39 - 40.
5. Г.А. Байдаков, Н.А. Богатов, А.М. Кузнецова, В.В. Папко, Д.А. Сергеев, А.А. Кандауров, М.И. Вдовин, Ю.И. Троицкая. Натурные измерения и численное моделирование ветра и волн при малых значениях разгона волн // Сборник трудов конференции «Комплексные исследования морей России: оперативная океанография и экспедиционные исследования 2016», с. 233-238.
6. Г.А.Байдаков, Н.А.Богатов, М.И.Вдовин, А.А.Кандауров, А.М.Кузнецова, В.В.Папко, Д.А.Сергеев, Ю.И.Троицкая Натурные исследования особенностей ветро-волнового взаимодействия при малых значениях разгона волн // Труды XIII всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» СПб: СПбНЦ РАН, 2016, с. 140-143
7. Александра Кузнецова, Владислав Папко, 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.
8. Александра Кузнецова, Георгий Байдаков, Владислав Папко, Александр Кандауров, Максим Вдовин, Даниил Сергеев, Юлия Троицкая, Моделирование ветровых волн на внутреннем водоеме адаптированным программным комплексом WAVEWATCH III // 20-я сессия молодых ученых, Нижегородская область, Россия, 19 - 22 мая, (2015), с. 34 – 36.
9. Alexandra Kuznetsova, Dmitry Zenkovich, Vladislav Papko, Alexander Kandaurov, Georgy Baidakov, Maxim Vdovin, Daniil Sergeev, Yuliya Troitskaya, 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.
10. Alexandra Kuznetsova, Dmitry Zenkovich, Vladislav Papko, Alexander Kandaurov, Georgy Baidakov, Maxim Vdovin, Daniil Sergeev, Yuliya Troitskaya, Tuning of the WAVEWATCH III 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.
11. Александра Кузнецова, Дмитрий Зенькович, Владислав Папко, Александр Кандауров, Георгий Байдаков, Максим Вдовин, Даниил Сергеев, Юлия Троицкая, Моделирование ветровых волн в озерной части Горьковского водохранилища программным комплексом WAVEWATCH III // 19-ая сессия молодых ученых, Нижегородская область, Россия, 27 - 30 мая, (2014), с. 48 – 51.

12. Alexandra Kuznetsova, Dmitry Zenkovich, Vladislav Papko, Alexander Kandaurov, Georgy Baidakov, Maxim Vdovin, Daniil Sergeev, Yuliya Troitskaya, 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.
13. N. Marinina, Yu. Troitskaya, D. Sergeev, V. Papko, G. Baidakov, M. Vdovin, A. Kandaurov, D. Zenkovich, A. Kuznetsova Field measurements of wind-wave interaction in the atmospheric boundary layer over a reservoir // Proceedings of the “Topical problems of nonlinear wave physics 2014”, p. 174 - 177, 2014.

Тезисы докладов

1. A.M. Kuznetsova, G.A. Baydakov, A.S.Dosaev, O. Vaha-Piikkio, L.Tuomi, V.V. Papko, D.A. Sergeev, Yu.I. Troitskaya, Wind waves modeling within adjusted WAVEWATCH III model, WISE meeting - 2018 (Waves in Shallow water Environment - 2018), Israel, Tel Aviv, April 22 - 26, (2018).
2. А.М. Кузнецова, Г.А. Байдаков, А.С. Досаев, А.А. Кандауров, М.И. Вдовин, В.В. Папко, Д.А. Сергеев, Ю.И. Троицкая. Численное моделирование поверхностных волн на малых разгонах внутренних водоемов // Тезисы докладов молодых ученых XVIII Научной школы "Нелинейные волны - 2018", 26 февраля – 4 марта 2018 года, Нижний Новгород, с.91 - 93.
3. A.M. Kuznetsova, A.S.Dosaev, G.A. Baydakov, D.A. Sergeev, Yu.I. Troitskaya Adjustment of the WW3 nonlinear source term DIA to the conditions of the middle-sized inland reservoir // Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-10004, 2018.
4. Georgy Baydakov, Vladislav Papko, Nikolay Bogatov, Alexander Kandaurov, Alexandra Kuznetsova, Daniil Sergeev, and Yuliya Troitskaya. Field investigation of the peculiarities of wind-wave interaction under conditions of water reservoirs // Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-10838, 2018.
5. A.M. Kuznetsova, A.S.Dosaev, G.A. Baydakov, V.V. Papko, D.A. Sergeev, Yu.I. Troitskaya, Surface wind waves on the reservoir modeling within adjusted WAVEWATCH III model, WISE meeting - 2017 (Waves in Shallow water Environment - 2017), Victoria, Canada, May 14 - 18, (2017).
6. Georgy Baydakov, Alexandra Kuznetsova, Daniil Sergeev, Vladislav Papko, Alexander Kandaurov, Maxim Vdovin, Yuliya Troitskaya. Field and numerical study of wind and surface waves at short fetches // Geophysical Research Abstracts, Vol. 18, EGU2016-14330, 2016.
7. Georgy Baydakov, Alexandra Kuznetsova, Daniil Sergeev, Vladislav Papko, Alexander Kandaurov, Maxim Vdovin, Yuliya Troitskaya Field and numerical study of wind-wave interaction at short fetches // EMS Annual Meeting Abstracts, Vol. 13, EMS2016-172, 2016.
8. Alexandra Kuznetsova, Yuliya Troitskaya, Alexander Kandaurov, Georgy Baidakov, Maxim Vdovin, Vladislav Papko, Daniil Sergeev, Wind waves modeling on the water body with coupled WRF and WAVEWATCH III models, Geophysical Research Abstracts, Vol.17, EGU2015-497, Vienne, Austria, April 12 – 17, (2015).
9. Georgy Baydakov, Alexandra Kuznetsova, Daniil Sergeev, Vladislav Papko, Alexander Kandaurov, Maxim Vdovin, and Yuliya Troitskaya. Field study and numerical modeling of wind and surface waves at the middle-sized water body, Geophysical Research Abstracts, Vol.17, EGU2015-9427, Vienne, Austria, April 12 – 17, (2015).

10. Georgy Baydakov, Alexandra Kuznetsova, Daniil Sergeev, Vladislav Papko, Alexander Kandaurov, Maxim Vdovin, Yuliya Troitskaya Field investigation and numerical modeling of wind-wave interaction at the middle-sized water body // EMS Annual Meeting Abstracts, Vol. 12, EMS2015-31, 2015.
11. Alexandra Kuznetsova, Georgy Baidakov, Vladislav Papko, Alexander Kandaurov, Maxim Vdovin, Daniil Sergeev, Yuliya Troitskaya, Verification of the experimental parameterization of the drag coefficient for the middle-sized water body in the framework of WAVEWATCH III model, WISE meeting - 2015 (Waves in Shallow water Environment - 2015), Goa, India, March 15 - 19, (2015).
12. Yuliya Troitskaya, Daniil Sergeev, Vladislav Papko, Georgy Baydakov, Maxim Vdovin, Alexander Kandaurov, Dmitry Zenkovich, Alexandra Kuznetsova. Field measurements of wind-wave interaction in the atmosphere boundary layer, International symposium «Topical problems of nonlinear Wave Physics 2014», Nizhny Novgorod, Russia, July 17 - July 23, (2014), pp. 174 – 175.
13. Alexandra Kuznetsova, Dmitry Zenkovich, Vladislav Papko, Alexander Kandaurov, Georgy Baidakov, Maxim Vdovin, Daniil Sergeev, Yuliya Troitskaya, Application of WAVEWATCH III to modeling of wind waves on the lake-like basin of Gorky Reservoir, WISE meeting - 2014 (Waves in Shallow water Environment - 2014), Reading, United Kingdom, June 8 - 12, (2014).
14. Alexandra Kuznetsova, Yuliya Troitskaya, Dmitry Zenkovich, Vladislav Papko, Alexander Kandaurov, Georgy Baidakov, Maxim Vdovin, Daniil Sergeev, Modeling of wind waves on the lake-like basin of Gorky Reservoir with WAVEWATCH III, Geophysical Research Abstracts, Vol.16, EGU2014-5053, Vienne, Austria, April 27 – May 2, (2014).
15. Yu.Troitskaya, G.Rybushkina, I.Soustova, A.Kuznetsova, A.Khvostov, G.Baidakov, S.Lebedev, A.Panutin, Adaptive re-tracking algorithm for retrieval of water level variations and wave heights from satellite altimetry data for middle-sized inland water bodies, 40th COSPAR Scientific Assembly, 2–10 August 2014, Moscow, Russia, (2014).