

УТВЕРЖДАЮ

директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Института физики  
атмосферы им. А.М.Обухова Российской академии  
наук (ИФА им. А.М. Обухова РАН)

д.ф.-м.н.



Куличков С.Н.

### **ОТЗЫВ**

ведущей организации на диссертацию  
Кузнецовой Александры Михайловны

### **«Численное моделирование поверхностного ветрового волнения на коротких разгонах»,**

представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

*по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы*

Диссертационное исследование Кузнецовой Александры Михайловны на тему **«Численное моделирование поверхностного ветрового волнения на коротких разгонах»** состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы.

**Актуальность** темы исследования объясняется тем, что в настоящее время математические модели являются самым мощным средством для решения задач диагноза ветрового волнения на глубокой воде и на мелководье. При этом успешное решение задачи зависит от качества модели и точности задания поля ветра. Но при этом если для океана и даже для прибрежных зон существует самый разнообразный опыт применения и модификации ветро-волновых моделей, то для замкнутых водоемов с ограниченным разгоном подобные работы практически отсутствуют. Несмотря на современное развитие

теории волн, методов математической статистики и появление нового поколения наблюдательной и вычислительной техники, а также развитие средств дистанционного зондирования, ситуация с изучением, прогнозированием и оценкой волн в относительно небольших замкнутых водоемах остается достаточно сложной и неопределенной. Попытки использовать те же подходы, что и для открытого океана приводит к серьезным ошибкам. При этом прогноз полей ветра и волнения на акваториях небольших водоемов и особенно водохранилищ крайне важен, так как волнение и ветровой режим являются важнейшими факторами, определяющими эрозию берегов, их учет необходим при обеспечении безопасности судоходства, особенно маломерных судов. Водоохранилища стали неотъемлемой частью жизни и развития различных регионов России. Но характеристики водной поверхности существенно отличаются от характеристик суши, что вносит существенные изменения в режим взаимодействия атмосферы и поверхности. Поэтому, кроме очевидного хозяйственного значения, водохранилища стали и источником проблем, с которыми раньше жители удаленных от морей территорий не сталкивались – это и изменение ветрового режима, и повышенное влагосодержание атмосферы, которое приводит к туману, гололедам и изморози. Большие резервуары воды изменили климат прилегающих территорий, и эти изменения продолжают происходить, часто являясь причиной экстремальных погодных явлений. Но прогнозировать погодные и климатические изменения невозможно без учета волно-ветрового режима водохранилища. При этом необходимо учитывать, что стандартные параметризации, применимые для больших разгонов волн, здесь работать не будут.

**Целью** 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.

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 натуральных измерений.
2. Изучена чувствительность результатов моделирования параметров волн на коротких разгонах к использованию параметризаций четырехволновых нелинейных

взаимодействий, с новыми предложенными оптимизированными для коротких разгонов параметрами, и проведена верификация на основе натуральных измерений

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

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

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

Результаты диссертационного исследования подразумевают непосредственное использование разработанных методов и алгоритмов для исследования и прогноза ветрового волнения на небольших акваториях. Это показывает высокую **научную и практическую значимость** работы. Также в работе показана возможность использования разработанного подхода для прибрежных зон.

Полученные диссертантом научные результаты реализованы в виде комбинированной системы анализа ветра и волнения, полученной при объединении волновой и атмосферной моделей, которая позволяет прогнозировать параметры волнения не только для замкнутых водоемов, но и для прибрежных зон.

Основные результаты, представленные в диссертации, получены в рамках грантов РФФИ (инициативные и региональные), грантов РФ (19-17-00209, 14-17-00667, 15-17-20009), грантов Президента РФ молодым кандидатам наук (МК-5575.2012.5, МК-2041.2017.5).

**Содержание**, представленной на отзыв диссертации, хорошо структурировано и соответствует поставленным цели и задачам, отражает заявленные автором исследовательские подходы и может быть оценено как полное описание аргументаций, выдвинутых соискателем положений на защиту.

Во **введении** обоснована актуальность темы работы, определены цели и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы, освещено современное состояние исследуемой проблемы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** содержится обзор литературы, посвященной исследуемой тематике. Представлен анализ исследований, сформировавших современные представления о численном моделировании поверхностного волнения, приведены современные модели ветрового волнения, обсуждаются вопросы валидации этих моделей.

Во **второй главе** обсуждаются особенности моделирования волн на коротких разгонах. Рассмотрены методы подстройки океанской волновой модели к условиям внутренних водоемов средних размеров. Обсуждается важность корректного учета ветроволнового взаимодействия на коротких разгонах. Для уточнения счета модели WW3 на внутренних водоемах средних размеров использована полученная в результате натурных измерений параметризации коэффициента аэродинамического сопротивления  $C_D(U_{10})$ . Выбраны "оптимальные" параметры для использованных параметризаций ветровой накачки, адаптированных к условиям внутреннего водоема. Основным итогом главы является адаптация модели WAVEWATCH III к условиям внутренних водоемов.

**Третья глава** показывает возможность применения 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. Продемонстрировано, что полученная при аналогичных условиях коротких разгонов Горьковского водохранилища параметризация аэродинамического сопротивления  $C_D(U_{10})$  и адаптированная модель WW3 обеспечивают лучшее соответствие расчетных данных и данных натурных измерений. Показано что допущение об однородности ветра над всей акваторией водоема с учетом временной изменчивости, задаваемой из эксперимента, является источником возможных погрешностей численного эксперимента,

В **четвертой главе** реализованы способы уточнения задания ветровой накачки. Для уточнения задания поля ветра используется атмосферная модель WRF с вихреразрешающим блоком. Показано преимущество использования ветра из атмосферной модели вместо данных реанализа, которые не имеют пространственной

изменчивости, достаточной для условий внутренних вод и прибрежной зоны. На примере полигона Горьковского водохранилища показано, что использование объединенной модели WRF WW3 для прогноза волнения повышает точность моделирования в сравнении с применением данных реанализа приблизительно в 3 раза и показывает наилучшее совпадение с данными натурального эксперимента.

В результате рассмотрения вопросов, поставленных в работе перед диссертантом, Кузнецова Александра Михайловна приходит к ряду заслуживающих поддержки выводов, отражённых в **заключении**.

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

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

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

4. Для внутреннего водоема впервые предложена комбинированная система анализа ветра и волнения, полученная при объединении волновой и атмосферной моделей. На примере

данных натурных измерений показано, что для внутреннего водоема использование данной системы для прогноза волн на коротких разгонах повышает точность моделирования средних параметров волнения в сравнении с применением данных реанализа о скорости ветра.

Основные вопросы, которые возникли при прочтении работы:

1. Первое замечание связано с терминологией. В русскоязычной литературе LES обычно переводится как вихререзающее моделирование, а не метод крупных вихрей. Как и  $u^*$  в русской литературе обычно называется динамической скоростью.
2. При разработке параметризации коэффициента сопротивления учитывалась его зависимость только от скорости ветра. Но сопротивление морской поверхности, как и спектр ветрового волнения, в значительной степени зависит от стратификации атмосферы. Учитывалась ли эта зависимость? Для какого диапазона скоростей ветра разработана данная параметризация? Учитывалась ли поправка на стратификацию при расчете динамической скорости из профильных измерений? При использовании профильного метода определения характеристик приводного слоя важно учитывать возможные искажения профиля ветра из-за близости берега. Проводилась ли выборка данных по направлениям ветра?
3. В работе не рассматривается такой важный параметр взаимодействия атмосферы и морского волнения как параметр шероховатости поверхности. Проводились ли его оценки?
4. В данной работе модель WRF использовалась для задания поля ветра над акваторией водохранилища, а потом сопрягалась с волновой моделью. Но существуют уже готовые версии WRF с ветро-волновым блоком (WRF-WAVEWATCH III, WRF-SWAN), в том числе и адаптированные для внутренних водоемов (Великие озера). Рассматривалась ли возможность применения этих версий?
5. В диссертации нет указания на возможность использования совместных ветро-волновых-озерных моделей, что дает возможность учитывать, например, взаимодействие волн и течений.
6. Главной задачей автора является создание системы прогноза волнения для внутренних водоемов. Но также интерес может представлять и исследование климатологии морского волнения для указанных регионов. Но это больше пожелание

для дальнейшей работы.

В заключении хотелось бы сказать, что высказанные замечания имеют в основном дискуссионный и рекомендательный характер, и не умоляют общую положительную оценку проделанной соискателем работы.

Основные положения диссертации отражены в её автореферате, 9 научных статьях изданий из списка ВАК, в том числе в рейтинговых журналах, а также прошли обсуждения на более чем 20 российских и зарубежных конференциях.

Диссертация представляет собой результат тщательного научного исследования, выполненного на высоком профессиональном уровне и отличающегося новизной предложенных методов и подходов к решению поставленных задач. Особенно хочется отметить, что диссертация написана очень четко и аргументировано хорошим языком. Изложение автора отличается стройностью и обоснованностью выводов.

Результаты, полученные автором, представляют интерес для организаций РАН (ИОРАН, ИФА, ИВМ, ИПМ, ИВП, ИКИ), Росгидромета (ГОИН, ААНИИ, ГГО, ИПГ) и других, занимающихся океанологическими и прикладными исследованиями, а также исследованиями внутренних водоемов. Изложенные в работе результаты могут быть применимы для задач анализа процессов взаимодействия поверхности и атмосферы на внутренних водоемах, в том числе опасных явлений.

Обобщая содержание отзыва можно утверждать, что диссертационная работа А.М. Кузнецовой представляет самостоятельное, законченное и серьезное научное исследование, соответствующее мировым стандартам в области геофизических исследований. Основные цели диссертационной работы достигнуты. Положения, выносимые на защиту, в совокупности составляют научное достижение, сутью которого является развитие метода диагноза и прогноза ветрового волнения на замкнутых акваториях.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертационной работы.

Представленная диссертация **«Численное моделирование поверхностного ветрового волнения на коротких разгонах»**, отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Кузнецова Александра Михайловна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности *25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы*”.

Отзыв подготовлен:

Заведующая лабораторией взаимодействия атмосферы и океана Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Тел. 8-495-951-85-49, e-mail: [repina@ifaran.ru](mailto:repina@ifaran.ru) 119017, Москва, Пыжевский пер. 3

Доктор физико-математических наук,  
Профессор РАН  
Репина Ирина Анатольевна

Я, Репина Ирина Анатольевна, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Работа была доложена и одобрена на семинаре Отдела динамики атмосферы ИФА им. А.М. Обухова РАН 19 сентября 2019 г. (протокол семинара № 7/17).

Заведующий Отделом динамики атмосферы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

Академик  
Голицын Георгий Сергеевич

Отзыв заверен:

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук

Кандидат географических наук  
Краснокутская Людмила Дмитриевна