



Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации
Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»
(ФГБУ «ДВНИГМИ»)

Аналитический материал

AM.2025.03

Обзор современных отечественных работ в области изучения механизмов развития ветрового волнения

Владивосток 2025



РЕФЕРАТ

Приведён краткий обзор современного состояния в области изучения механизмов развития ветрового волнения. На основе научных публикаций рассмотрен вклад российских учёных.

Автор:

Вражкин А. Н. (вед. науч. сотр. ФГБУ «ДВНИГМИ», канд. техн. наук)

Дата составления: 08.12.2025



Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Основные направления в изучении ветрового волнения.....	4
2 Вклад Российских учёных в задачи моделирования волнения.....	6
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	8
Список используемых источников	8

ВВЕДЕНИЕ

Информация о ветровом волнении имеет огромное значение для обеспечения различных видов морской деятельности и наиболее востребована потребителями. Она используется для оперативного обслуживания экономики, получения расчётных характеристик волн, необходимых для проектирования различных типов судов, морских платформ, причальных сооружений и т.д. [1].

В настоящее время для реализации данных задач используются численные модели. В основном, заложенная в них физика слабо представлена результатами отечественных работ. Необходимость практического применения научных исследований и теорий российских учёных имеет принципиальное значение с целью поднятия престижа страны

1 Основные направления в изучении ветрового волнения

Если проанализировать международные и отечественные научно-исследовательские программы и мероприятия, можно заметить, что ветровому волнению отводится большое внимание как при изучении климата морей, так и прогнозов. В гидрометеорологической части инженерно-изыскательских проектов основная часть работ отводится получению характеристик режима волнения. При расчёте его параметров используются математические модели, которые описывают механизмы развития, затухания и распространения волн на глубокой воде и мелководье. Успешность и качество прогнозов определяется как самой моделью, так и настройкой её внутренних параметров для определённой акватории. Большую роль играют и исходные данные для расчётов – поля приводного ветра. Для замерзающих морей необходима информация о наличии льда.

Волновые модели используются в качестве основы современных методов прогноза состояния морской поверхности. Все прогностические центры используют их в своей оперативной деятельности. Возможности применения различных численных моделей объясняются только наличием вычислительных мощностей организации.

Модели ветрового волнения основаны на численном решении уравнения баланса энергии волн в спектральном представлении (уравнение Хассельмана), описывающего эволюцию спектра волн в пространстве в зависимости от времени. Под действием внешних полей, одним из которых является поле ветра, происходит рост, затухание и обрушение волн. Внутри самого спектра наблюдается перераспределение энергии. Роль механизмов, формирующих спектр, изучается теоретически и на основе анализа натурных и экспериментальных данных.

Итогом многих международных проектов, направленных на исследования ветрового волнения, явились математические модели и/или теории этого природного процесса. В

основном, они имеют практическую реализацию в виде отдельных блоков современных океанических моделей. Математическое описание физики волновых процессов постепенно усложняется и требует всё больших вычислительных мощностей.

В зависимости от способа решения ведущего уравнения баланса энергии, все волновые модели делятся на три типа [2]. К первой группе относятся дискретные спектральные модели. Частотный и угловой спектр получают путём решения уравнения переноса. Способ решения – конечно-разностные схемы. Вторая группа – параметрические модели, в которых полагается, что частотный спектр на глубокой воде является автомодельным. Третья группа – интегрально-параметрические модели, в которых уравнение баланса энергии проинтегрировано по частоте. Кроме того, существует группа методов, основанных на эмпирических подходах, которые показали свою высокую надёжность. Следует упомянуть и различные комбинированные способы расчёта, которые заложены в нормативных документах и СНИПах. На современном этапе наибольшее применение получили дискретные спектральные модели третьего поколения, чему способствовало развитие вычислительной техники. Наиболее известная и получившая самое широкое практическое применение в мире — глобальная модель WAVEWATCH-III. Для прибрежной зоны (условия мелкой воды) такой моделью является SWAN.

На современном этапе выделяют два подхода к численному моделированию волнения [3]: фазо-разрешающие (или прямое моделирование волн) и спектральные модели. Основное применение спектральных моделей – прогнозирование волнения в прибрежных и открытых акваториях Мирового океана. По ним проводятся расчёты за большой период времени с целью изучения волнового режима и климата. Модели данного типа позволяют дать представление о распределении волновой энергии по направлению и частоте.

Фазо-разрешающее моделирование воспроизводит реальный физический процесс. На основе решения полных уравнений гидродинамики воссоздаётся эволюция возвышения поверхности и поля скорости в физическом пространстве. Модели данного вида сложны и требуют больших вычислительных мощностей и времени счёта, что в настоящее время неприемлемо для целей прогноза.

В Российской Федерации проводятся работы по двум направлениям: адаптация существующих волновых моделей для целей прогноза и климата и создание теоретических основ новых волновых моделей.

Для решения первой задачи используется модель WW-III [4, 5, 6]. Основное отличие выполняемых работ заключается в сборке, т.е. использовании различных основных механизмов генерации и затухания волн, предлагаемых в модели, а также шага и варианта



расчётных сеток (структурных, триангуляционных и с переменным шагом). В конечном итоге все эти исследования направлены на создание оперативных технологий прогноза волнения.

2 Вклад Российских учёных в задачи моделирования волнения

В области разработки новых моделей отечественная наука ищет альтернативные пути. Это поиск вызван недостаточной обеспеченностью ЭВМ с высоким быстродействием. Стоит отдать должное в успехах на этом направлении, полученных ленинградской группой во главе с И.Н. Давиданом и московской командой во главе с В.Е. Захаровым, заслуги которых неоспоримы. Огромным тормозом в работе российских специалистов является отсутствие инструментальных наблюдений за волнением, прежде всего спутниковых. Подавляющий источник данных имеет коммерческое происхождение. В большинстве своём, они носят эпизодический характер и получены во время выполнения гидротехнических работ. Для использования этих данных в научных целях требуется разрешение правообладателя, а для начала необходимо найти сведения о наличии волномерных записей и их владельце.

В идеале наблюдения должны вестись длительный период времени и фиксировать штормовые ситуации в различные сезоны года, что позволит объективно изучать закономерности генерации, затухания и перераспределения энергии волнами.

Из отечественных теоретических работ с конца XX века и по настоящее время можно выделить два направления в развитии основ численного моделирования ветрового волнения. К фазо-разрешающему моделированию относятся работы Д.В. Чаликова [7, 8, 9]. Построенные этим исследователем модели позволяют переходить от трёхмерной задачи к двумерной, что даёт выигрыш в быстродействии расчётов. Однако этого выигрыша недостаточно для применения созданных моделей в прогностических целях. Поэтому в настоящее время они носят исследовательский статус.

В спектральной модели WW-III реализована теория волнового пограничного слоя Д.В. Чаликова [10], в которой профиль ветра отличается от логарифмического. Именно она была основным механизмом генерации волн, вошедшей в первую версию WW-III. В настоящее время предложена новая одномерная модель волнового пограничного слоя [11]. В перспективе эти теоретические решения, по заключению авторов, могут быть использованы в атмосферных и волновых моделях.

Второе направление отечественных работ связано с применением теории нелинейного взаимодействие волн. Хассельманн [12] вывел формулу, описывающую

нелинейный четырёх-волновой механизм, в виде интегрального уравнения сложной формы. Расчёт этого интеграла требует много времени. Была предложено решение, известное как приближение дискретных взаимодействий (Discrete Interaction Approximation, далее DIA), где вместо точного решения интеграла произведена замена, основанная на вычислении одного единственного слагаемого. Компьютерная реализация DIA до сих пор используется в волновых моделях.

Если в DIA выбирается фиксированная конфигурация 4-х взаимодействующих волн, удовлетворяющих условиям резонанса, то В.Г. Полников [13] предложил решение, отказывающееся от точного выполнения резонансов. Этим достигается выигрыш по времени счёта и уменьшение ошибок модельных высот волн. Такая реализация называется Fast DIA, которая оформлена в качестве РИД. Компьютерная подпрограмма тестировалась автором на моделях WAM и WW-III.

Исходя из теоретических основ, разработанных В.Е. Захаровым [14], сотрудниками института Океанологии Российской Академии наук и Государственного океанографического института имени Н.Н. Зубова Росгидромета создана волновая модель РАВМ [15]. Она относится к поколению 2+ по одной причине: при переходе от двумерного спектра к одномерному и обратно, используется одномодальное распределение углового спектра.

Основная идея теории «узконаправленного» нелинейного взаимодействия Захарова заключается в том, что двумерный спектр от частоты и направления заменяется двумя интегральными функциями: одномерным спектром от волнового числа и параметром «узконаправленности». В результате интеграл нелинейного взаимодействия сводится к дифференциальному виду. Асимптотические решения для вида высокочастотного участка спектра получены автором модели В.Е. Захаровым аналитически.

Механизм поступления энергии от ветра к волнам является предметом многочисленных теоретических и экспериментальных исследований. Теоретические основы данного процесса базируются на многочисленных предположениях, ограничивающих применение соответствующего члена в уравнении энергетического баланса волн в спектральном виде. На основе численного моделирования в [16] рассмотрена новая запись накачки степенного типа в комбинации с «неявной» диссипацией. Показано, что построенная модель улучшает качество расчётов ветрового волнения и требует минимальной регулировки параметров. В дальнейшем данный подход был реализован И.М. Кабатченко в новой версии модели РАВМ.

В.Г. Полниковым было высказано мнение [17], что для создания отечественной современной волновой модели должны быть потребитель государственного уровня,

коллектив программистов, имеющих опыт работ с моделями, и соответствующее финансирование. По информации, полученной в процессе общения с разработчиками WW-III, первоначальный годовой объём финансирования составлял около 0,5 млн. долларов США, с последующим увеличением выделенных средств до 10–20 млн. на этапах дальнейшего развития модели по мере привлечения групп участников из других стран.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка более совершенных версий российских волновых моделей может идти двумя путями. Во-первых, в рамках создания конкурентоспособной модели, включающей результаты современных отечественных научных исследований. Во-вторых, с помощью внедрения новых модулей в существующие модели. Второй путь несколько проще, тем не менее, он также позволяет повысить престиж страны и показать применимость отечественных разработок в решении задач моделирования волновых процессов.

Список используемых источников

1. Абузяров З.К. Вопросы оперативного применения численных прогностических моделей ветрового волнения в Гидрометцентре России. // Труды Гидрометцентра России. — 2003.— Вып.339. — URL: <https://method.meteorf.ru/publ/tr/tr339/abuzyar3.rtf> (дата обращения 2025-11-25).
2. Матушевский Г.В. Современные модели расчёта ветрового волнения. // Метеорология и гидрология. — 1995. — № 6. — С. 51–62.
3. Фокина К.В. Испытания ускоренной двухмерной модели поверхностных потенциальных волн. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2023. — Т. 16, № 2. — С. 34–43. DOI: 10.59887/2073–6673.2023.16(2)-3.
4. Мысленков С.А. Моделирование ветрового волнения в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2023. – № 1 (387). – С. 87–101. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-1-87-101.
5. Vrazhkin A.N. Evaluation of the quality of forecasts for the wind-induced waves in the Sea of Japan and the Sea of Bering // Asia-Pacific Journal of Marine Science&Education. — 2018. — No. 2 (May 2018). — P. 80–88.
6. Зеленько А.А., Мысленков С.А., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Зайченко М.Ю. Комплексная система прогнозирования параметров ветрового волнения в Мировом океане и морях России. // Метеорология и гидрология. — 2024. — № 3. — С. 20–35.

-
7. Чаликов Д.В. Различные подходы к моделированию морских волн. // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2022. — Т. 15, № 1. — С. 19–32. DOI: 10.48612/fpg/u1df-m1x7-1bxg
8. Фокина К.В., Чаликов Д.В. Численное исследование статистических характеристик развивающегося волнения. // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — ES2010. — DOI: 10.2205/2024es000878.
9. Chalikov D. V. Numerical Modeling of Sea Waves. — Springer International Publishing, 2016. — 330 p. DOI: 10.1007/978-3-319-32916-1
10. Tolman H., Chalikov D. On the source terms in a third-generation wind wave model. // J. Phys. Oceanogr. — 1996. — Vol. 11. — P. 2497–2518.
11. Чаликов Д.В., Булгаков К.Ю. Структура приводного слоя атмосферы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. — 2019. Т. 12, № 2. — С. 50–65.
12. Hasselmann K. On the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. P 1. General theory // J. Fluid Mech. — 1962. — V. 12, № 4.— P. 481–500.
13. Polnikov V.G, Farina L. On the problem of optimal approximation of the fourwave kinetic integral// Nonlinear Processes in Geophysics. 2002. V. 9. P. 497–512.
14. Захаров В.Е., Смилга А. О квазиоднородных спектрах слабой турбулентности // Журнал экспериментальной и теоретической физики – 1981. – Т. 81. – Вып. 4 (10). – С. 318–326
15. Zakharov V.E., Zaslavskii M.M., Kabatchenko I.M., Matushevskii G.V., Polnikov V.G. (1999) Conceptually new wind-wave model //The Wind Driven Air-Sea Interface. Proc. ASI-93. – Sydney, Australia. – P. 159–164.
16. Zakharov V., Resio D., and Pushkarev A. Balanced source terms for wave generation within the Hasselmann equation. // Nonlin. Proc. Geophys. — 2017. — Vol. 24. — P. 581–597. DOI: 10.5194/npg-24-581-2017
17. Полников В.Г. Теоретические основы создания отечественной модели ветрового волнения мирового уровня. // Труды ГОИН — 2020.— № 221. — С. 81–96.