



УДК 551.466.33.001.572

Кузнецова Александра Михайловна, младший научный сотрудник ИПФ РАН

Байдаков Георгий Алексеевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник ИПФРАН

Троицкая Юлия Игоревна, д.ф.-м.н., заведующая отделом нелинейных геофизических процессов ИПФРАН

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН»
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Работа Кузнецовой А.М. по численному моделированию поверхностного волнения поддержана грантом РФФИ 18-35-00602, работа Байдакова Г.А. по проведению натурных исследований поддержана грантом РФФИ 17-05-41117, работа Кузнецовой А.М. по обработке и интерпретации результатов поддержана грантом РФФИ 18-05-00292.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ВОЛНЕНИЯ НА ГОРЬКОВСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Ключевые слова: численное моделирование, поверхностное волнение, внутренний водоем, параметризация.

Аннотация. Доклад посвящен моделированию ветра и волнения на внутренних водоемах с использованием современных глобальных моделей WAVEWATCH III и WRF. При моделировании учтены особенности внутренних водоемов, для чего изменены открытые программные коды. Расчеты проводились для акватории Горьковского водохранилища. Проведена валидация данными натурных экспериментов.

Введение.

Комплексное изучение ветроволнового режима водохранилищ и внутренних водоемов является важной и актуальной задачей, поскольку ветровое волнение оказывает существенное влияние на хозяйственную деятельность. Волнение и ветровой режим внутренних водоемов являются важнейшими факторами, определяющими эрозию берегов, их учет необходим при обеспечении безопасности судоходства, особенно маломерных судов.

Малые ветровые разгоны характеризуются более высокими по сравнению с условиями открытых морей и океанов значениями параметра возраста волнения. К особенностям волн на малых разгонах относится более интенсивная ветровая накачка, пропорциональная отношению динамической скорости ветра к фазовой скорости волны. Кроме того, появляются более крутые волны, и можно ожидать появления новых нелинейных эффектов. Существующие прогнозы волнения на озерах и водохранилищах опираются на эмпирические модели [1, 2]. 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. 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 волновые модели ориентированы, прежде всего, к условиям развитого волнения морей и океанов. В данной работе приведена адаптация волновой модели WAVEWATCH III к условиям коротких разгонов на примере Горьковского водохранилища. Данные измерений, проводимых нами на полигоне Горьковского водохранилища, легли в основу адаптации модели.

Моделирование волнения с использованием адаптированной модели WAVEWATCH III.

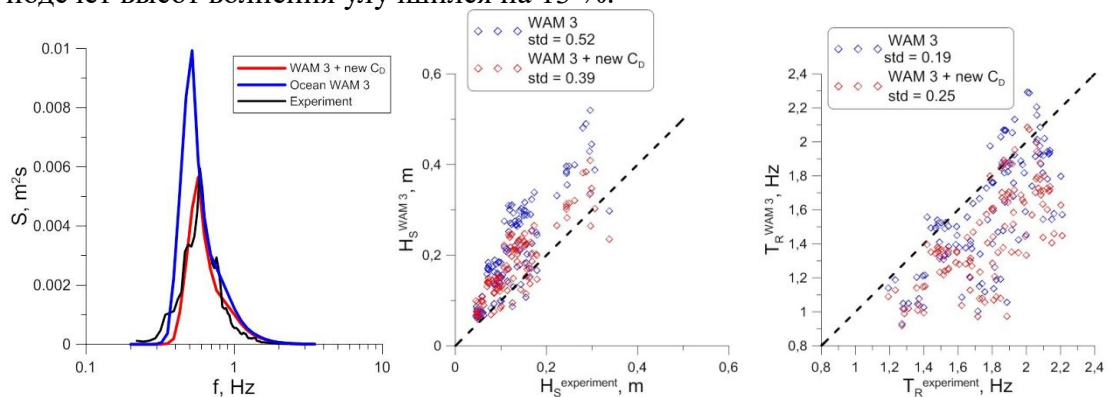
Моделирование волнения на Горьковском водохранилище осуществлялось при помощи модели WAVEWATCH III (WW3) [3]. Программный комплекс модели WW3 находится в открытом доступе. Модель основана на численном решении уравнения Хассельмана для спектральной плотности волнового действия N .

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

Левая часть уравнения описывает кинематику волн. В правую часть входят динамические слагаемые: S_{nl} описывает 4х-волновое взаимодействие, S_{in} - нарастание волн под действием ветра и S_{dis} - диссипацию, обусловленную главным образом обрушением волн. Для учета особенностей коротких разгонов волн подстройка океанской волновой должна быть осуществлена в два этапа: подстройка ветровой накачки и интеграла столкновений Больцмана. Диссипация из-за опрокидывания волн носит универсальный характер.

Первый этап подстройки модели WW3 был реализован в [4] с использованием параметризации C_D от U_{10} , полученной в результате серии натурных экспериментов, описанных выше. Счет был произведен двумя способами: во-первых, в рамках океанской параметризации WAM3 [5], в которой используется линейная зависимость C_D от U_{10} [6], во-вторых, с предложенной нами параметризацией C_D [4] и инкрементом ветровой накачки из WAM3.

Одномерные спектры возвышений в точке измерений, полученные в натурном эксперименте, сравнивались с полученными одномерными спектрами численного эксперимента при разных параметризациях ветровой накачки (рис.1 а). Видно, что неизменная накачка сильно завышает значения. Также было проведено сравнение интегральных характеристик спектров (высоты значительных волн и среднего периода волнения) для всех проведенных экспериментов. На рис. 1 б, в штриховой линии обозначена биссектриса угла, означающая равенство характеристик, соответствие натурному эксперименту. Изменение модели незначительно повлияло на подсчет периода волн, но подсчет высот волнения улучшился на 13 %.



а)

б)

в)

Рис. 1. а) Одномерные спектры возвышений, б) высоты значительных волн и в) средние периоды волнения для WAM 3, измененной WAM 3.

Второй этап подстройки связан с адаптацией схемы приближенного вычисления интеграла Больцмана Discrete Interaction Approximation (DIA). Схема DIA управляется двумя параметрами, первая - λ_{nl} , определяющая взаимодействующую зеркальную пару векторов, вторая - константа пропорциональности C , отвечающая за вклад члена нелинейного источника в итоговый спектр. Нелинейные взаимодействия обычно вычисляются в WW3 при помощи комбинации $(\lambda_{nl}, C) = (0,25, 3 * 10^7)$. Подбор оптимальных для исследуемой акватории комбинации параметров обеспечил подстройку интеграла столкновений [7].

Приведем пример влияние использования предложенных "оптимальных" параметров на расчет эволюции волнения для тестового дня 14.07.2017 при использовании адаптированной параметризации ветровой накачки WAM3 (Рис.2 а, б). 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%.

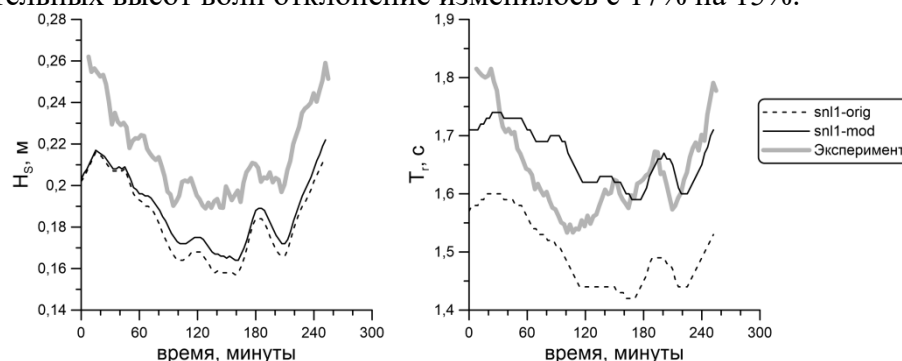


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные данные для оригинальной версии DIA и для DIA с предложенными "оптимальными" параметрами для тестового дня 14.07.2017: (а) значительные высоты волн и (б) средневзвешенные периоды волнения при ветровой накачке WAM3.

Задание входного ветра при помощи модели WRF.

Однако ключевую роль при моделировании поверхностного волнения играет также правильное задание накачки ветром, тогда как задание ветра над водоемом однородным может являться источником ошибок в численном эксперименте. При этом в практике при моделировании ветровых волн на поверхности морей и океанов для задания ветровой накачки обычно используют данные реанализа. На акваториях внутренних водоемов средних размеров этот подход неприменим из-за слишком низкого пространственного разрешения ($2,5^0$). Поэтому для задания корректной ветровой накачки было предложено использование атмосферной модели WRF [8] с высоким пространственным разрешением. Для применения модели WRF к условиям Горьковского водохранилища была проведена адаптация модели, описанная в [9]. Расчет поля ветра производился для четырех вложенных доменов, в четвертом домене с минимальным размером ячейки 1 км (Рис. 3 а) расчет производился методом крупных вихрей. Ключевым результатом стало объединение атмосферной и волновой модели ("1-way coupling"). Применение накачки ветром при помощи WRF (LES) при моделировании волнения в WAVEWATCH III обеспечивает высокую пространственную изменчивость.

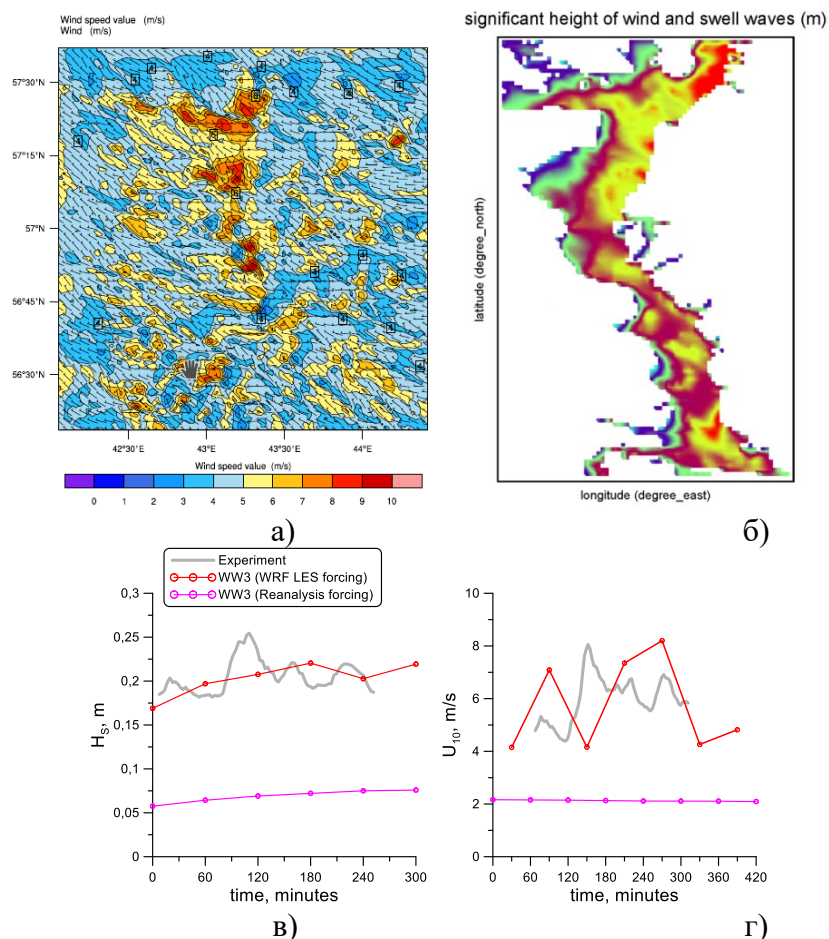


Рис. 3. а) Распределение ветра над акваторией Горьковского водохранилища, результат расчета WRF (LES); б) распределение значительной высоты волнения на Горьковском водохранилище для тестового дня 08.08.17, результат WW3 при накачке ветром WRF (LES); сравнение расчетных данных высот волн (в) и скорости ветра (г) в точке с данными натурных измерений.

Выводы

Предложена региональная модель, основанная на адаптированной к условиям внутреннего водоема среднего размера глобальной волновой модели WW3, первоначально настроенной на условия морей и океанов, а также на адаптированной атмосферной модели WRF, используемой для расчета входного ветра в модель WW3. Проведена верификация предложенной адаптации модели данными in-situ. Полученная модель может быть использована на других акваториях со схожими параметрами.

Координаты для обратной связи: +79108896217, umnyaginaam@yandex.ru
Секция 10 (Физика)

Список литературы:

- [1] С.Поддубный, Е.Сухова. Моделирование влияния гидродинамических и антропогенных факторов на распределение гидробионтов в водохранилищах: руководство для пользователей. // Рыбинск, Рыбинский дом печати. - 2002.
- [2] Е. Н. Сутырина. Определение характеристик волнового режима Братского водохранилища // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. - 2011. - Т. 4. - №2.
- [3] The WAVEWATCH III Development Group (WW3DG), 2016: Us. man. and sys. doc. of WAVEWATCH III v. 5.16. Tech. Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, USA, 326 pp. + App.
- [4] Kuznetsova A.M. et al. Adjusting of wind input source term in WAVEWATCH III model for the middle-sized water body on the basis of the field experiment // Adv. in Met., Vol. 1, ID 574602, 2016.
- [5] Snyder, R.L. et al. Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves // J. Fluid Mech., vol.102, pp. 1-59. 1981.

[6] Wu, J. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane // J. Geophys. Res., vol. 87, pp. 9704 – 9706. 1982.

[7] Кузнецова А.М., Досаев А.С., Байдаков Г.А., Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И. Адаптация параметризации нелинейности для случая коротких разгонов в модели прогноза волнения// Известия РАН, ФАО, 2019, направлена в печать.

[8] Skamarock, W. C., et al., 2008: A Description of the Advanced Research WRF V. 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp.

[9] Kuznetsova A.M. et al. Field and numerical study of the wind-wave regime on the Gorky Reservoir. // GSE, Vol. 9, № 2, 2016.

SIMULATION OF SURFACE WIND WAVES ON THE GORKY RESERVOIR

Alexandra M. Kuznetsova, Georgy A. Baydakov, Yuliya I. Troitskaya

Keywords: simulation, surface waves, inland water body, parameterization

The report is devoted to the simulation of wind and waves in the inland waters using modern global models WAVEWATCH III and WRF. In modeling, the features of the internal reservoirs are taken into account, therefore the open program codes have been changed. The simulation were carried out for the Gorky reservoir. The validation of the results with the results of field experiments was performed.