УДК 551.466.33.001.572

АДАПТАЦИЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ НЕЛИНЕЙНОГО ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ ДЛЯ СЛУЧАЯ КОРОТКИХ РАЗГОНОВ В МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ВОЛНЕНИЯ WAVEWATCH III

© 2020 г. А. М. Кузнецова^{*a*, *}, А. С. Досаев^{*a*}, Г. А. Байдаков^{*a*}, Д. А. Сергеев^{*a*}, Ю. И. Троицкая^{*a*, *b*}

^аИнститут прикладной физики Российской академии наук, ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950 Россия ^bИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, пер. Пыжевский, 3, Москва, 119017 Россия

> *e-mail: alexandra@ipfran.ru Поступила в редакцию 25.06.2019 г. После доработки 18.10.2019 г. Принята к публикации 20.11.2019 г.

В волновой модели WAVEWATCH III произведена оптимизация параметризации нелинейного переноса энергии Discrete Interaction Approximation (DIA) по критерию минимизации отклонений предсказаний модели от данных натурных измерений. Был рассмотрен случай коротких разгонов, для которого ранее была подстроена функция источника накачки. Проведено сравнение результатов численного счета и натурного эксперимента для встроенной версии DIA и для DIA с предложенными параметрами. Показано улучшение воспроизведения моделью основных параметров спектров волнения, значительной высоты волн и их среднего периода.

Ключевые слова: поверхностные волны, ветроволновое взаимодействие, моделирование, WAVEWATCH III, четырехволновые резонансные взаимодействия, короткие разгоны **DOI:** 10.31857/S0002351520020078

введение

Поверхностные волны относятся к явлениям, которые в наибольшей степени влияют на все сферы морской деятельности, 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, основанных на спектральном представлении волнового поля, например, WAVEWATCH III [1], SWAN [2], WAM [3], а также модели циркуляции атмосферы, например, WRF [4], ECMWF [5].

Однако при моделировании ветра и волнения на акватории внутренних водоемов остается ряд проблем. Пространственное разрешение расчетных сеток поверхностного волнения и параметров атмосферы для внутренних водоемов является достаточно грубым. Попытки простого использования глобальных моделей для локального прогноза на более мелкой сетке без специальной адаптации обычно приводят к некорректным результатам, так как условия внутреннего водоема обладают рядом особенностей, которые необходимо учитывать при составлении прогнозов ветра и волнения высокого пространственного разрешения. В их числе малые разгоны ветра, при которых наблюдаются более высокие значения параметра возраста волнения U_{10}/c_p [6]. Для этих условий характерна более сильная нелинейность, вызванная большой крутизной волн.

Таким образом, возникает задача адаптации vже имеюшихся глобальных волновых моделей. например, WAVEWATCH III (WW3) [1], ориентированных, прежде всего, на океанские условия, к условиям внутренних водоемов. В современных моделях третьего поколения [7], к которым относится WW3, при моделировании поверхностных волн учитывается нелинейное четырехволновое взаимодействие волн наряду с ветроволновым взаимодействием и диссипацией из-за обрушений в случае глубокой воды. В ранее опубликованных работах была описана адаптация модели WW3 к условиям внутреннего водоема средних размеров на основе данных натурного эксперимента, в работах [8, 9] была осуществлена подстройка модели ветроволнового взаимодействия. Использование новой параметризации $C_D(U_{10})$, полученной на основе измерений на водохранилище, снизило значения и_{*}, и, следовательно, скорость роста волн за счет ветровой накачки, что улучшило согласие в данных значительных высот волн H_S натурного 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. Проблемы занижения периода для небольших разгонов известны давно [10]. Применительно к рассматриваемой ситуации это можно объяснить тем, что параметризация нелинейного переноса энергии настроена на моделирование менее крутых волн, типичных для условий открытого океана. Целью настоящей работы является подстройка аппроксимации нелинейных четырехволновых взаимодействий в модели WW3 применительно к условиям внутренних водоемов.

МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ВОЛНЕНИЯ

Программный комплекс модели WW3 основан на численном решении уравнения Хассельмана для спектральной плотности волнового действия $N(k, \theta; x, t)$ [1]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{S_{tot}}{\omega},\tag{1}$$

где левая часть уравнения (1) описывает распространение волны с частотой ω и волновым вектором **k**, которые связаны дисперсионным соотношением

$$\omega^2 = gkthkd.$$
(2)

Правая часть уравнения (1) представляет собой источники и стоки энергии волны S_{tot} , включая ветровую накачку (S_{in}), нелинейные взаимодействия (S_{nl}), диссипацию (S_{dis}) и ряд дополнительных процессов.

В настоящее время считается признанным тот факт, что нелинейное четырехволновое взаимодействие играет важную роль в эволюции ветровых волн. Важность переноса энергии при четырехволновом взаимодействии была отмечена в работе Филипса [11]. В работе Хассельмана [12] была развита слабонелинейная теория применительно к волнам на поверхности воды. Было показано, что четыре гармоники, удовлетворяющие резонансным условиям вида:

$$\begin{cases} \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4 \\ \boldsymbol{\omega}_1 + \boldsymbol{\omega}_2 = \boldsymbol{\omega}_3 + \boldsymbol{\omega}_4 \end{cases}, \tag{3}$$

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

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

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = \iiint G(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4) \times \delta(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_4) \times \\ \times \delta(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4) \times [N_1 N_3 (N_4 - N_2) + (4) \\ + (N_3 - N_1) N_2 N_4] d\mathbf{k}_2 d\mathbf{k}_3 d\mathbf{k}_4.$$

Здесь N_i — плотность волнового действия гармонической волны с волновым вектором \mathbf{k}_i при резонансном взаимодействии с тремя другими гармоническими волнами с соответствующими волновыми векторами. Дельта-функции показывают, что вклад в интеграл (4) вносят только гармонические волны, удовлетворяющие (3), при этом они обеспечивают сохранение волнового действия [13]. G — коэффициент нелинейного взаимодействия, полученный для случая волн на поверхности слоя жидкости бесконечной глубины в работе [14].

В модели WW3 точное интегральное выражение, входящее в (4), 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 [15]. Широко используемая в мировом научном сообществе параметризация SNL1 – это аппроксимация Xacceльмана Discrete Interaction Approximation (DIA) [16, 17]. 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 (3) для этих векторов записываются следующим образом:

$$\begin{cases} \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4 \\ \omega_1 = \omega_2 \\ \omega_3 = (1 + \lambda)\omega_1 \\ \omega_4 = (1 - \lambda)\omega_1 \end{cases}$$
(5)

Характерная пара взаимодействующих векторов и их "зеркальная" пара изображены на рис. 1.

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

$$\begin{pmatrix} \delta SNL_{1,2} \\ \delta SNL_3 \\ \delta SNL_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} C_{nl} g^{-4} f^{11} \times$$

$$\times \left(E_{1,2}^2 \left(\frac{E_3}{\left(1+\lambda\right)^4} + \frac{E_4}{\left(1-\lambda\right)^4} \right) - 2E_{1,2} \frac{E_3 E_4}{\left(1-\lambda^2\right)^4} \right).$$
(6)

225

том 56 № 2 2020



Рис. 1. Схема конфигурации волновых векторов и их "зеркальная" пара для "дефолтных" параметров параметризации четырехволновых нелинейных взаимодействий DIA ("восьмерка" Филипса в **k**-плоскости). Серым цветом показаны взаимодействующие векторы до внесения изменений в параметризацию DIA, черным – после.

Здесь E_i — это плотности энергий взаимодействующих гармоник, g — гравитационная постоянная. $C_{nl} = 2.78 \times 10^7$, $\lambda = 0.25$ — "дефолтные" параметры модели DIA, предложенные в работе [17], где выбор значения параметров был осуществлен на основе сравнения с данными натурных измерений параметров волнения в открытом океане. Параметр λ определяет различие частот взаимодействующих гармоник, и параметр пропорциональности C_{nl} отражает вклад нелинейных четырехволновых взаимодействий в итоговый спектр. Изменяя эти параметры, можно управлять параметризацией DIA, как, например, это делалось в [18] для океанских условий. 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 в формуле (4), осуществленное в работах [19, 20], основанное на подходе WRT (Webb-Resio-Tracy method). Модель SNL3 (Generalized Multiple DIA, GMD) [21] 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 [22, 23].

Методы расчета нелинейных взаимодействий SNL1 (далее DIA) и его "расширение" SNL3 (далее GMD) были применены в рамках адаптированной к условиям внутреннего водоема модели WW3 на акватории полигона Горьковского водохранилища, удобного с точки зрения наличия большого объема накопленных авторами данных натурных измерений для верификации расчетов. Далее метод расчета нелинейных взаимодействий DIA был взят за основу для адаптации модели WW3 к условиям внутренних водоемов средних размеров как наиболее широко используемый и удобный для подстройки.

ОПИСАНИЕ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Примером внутреннего водоема средних размеров, для условий которого производились расчеты и адаптация модели WW3, послужило Горьковское водохранилище (р. Волга), на котором нашей группой проводились натурные исследования с 2012 г. и продолжаются по настоящий момент в летний сезон, когда водохранилище не покрыто льдом. Водохранилище имеет вытянутую форму (протяженность около 85 км, ширина 6–10 км), глубина водохранилища составляет 4–20 м, глубина в области измерений – 9–12 м в зависимости от сезона и выбора рабочей точки.

Для сопоставления с результатами численного моделирования использовались данные натурных измерений, проведенных в 2016-2017 гг. 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 [8], веха была модифицирована. Чтобы исключить влияние судна на процесс измерения, измерительный комплекс был автономнизирован. Веха удерживается якорем и неподвижна при стабильном направлении ветра. Резкое изменение направления ветра вызывает движение вехи 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.



Рис. 2. Зависимость коэффициента C_D от скорости ветра. Круги — результаты натурных измерений, красная линия — функция (7), линия с крупным пунктиром — результат из [26], линия с мелким пунктиром — результат из [27].

На мачте вехи 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 отдельном поплавке, соединенным с вехой и отслеживающем 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. [8]).

Кроме этого, веха 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 WAVEWATCH III к условиям водоемов.

Расположение точки измерений на водохранилище выбрано таким образом (см [8]), чтобы в широком диапазоне изменения направлений скорости ветра сохранялся постоянным разгон волн, который во всех экспериментах составлял 6—8 км. Скорость ветра, приведенная к стандартной метеорологической высоте 10 м, U_{10} при этом изменялась в диапазоне 2—13 м/с для различных дней измерений.

Была определена зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления водной поверхности C_D от скорости ветра, приведенной к стандартной метеорологической высоте $10 \text{ м} - U_{10}$. На рис. 2 приведен график полученной зависимости. Также на рис. 2 приведены результаты работ [24] и [25]. Видно, что при скорости ветра U_{10} больше 5 м/с результаты измерений хорошо описываются моделью COARE 3.0 (см. [25]), однако, при меньших скоростях ветра измеренные значения C_p лежат выше, и недостаточно точно описываются даже функцией, предложенной в [24]. Необходимо отметить, что модель COARE 3.0 не предполагает аналитической записи зависимости $C_D(U_{10})$ и потому не может быть использована в модели WAVEWATCH III без существенных модификаций программного кода, а функция, предложенная в [24], предсказывает завышенные значения по сравнению с экспериментальными данными. Полученные результаты были аппроксимированы простой аналитической зависимостью, и предложена параметризация:

$$C_D(U_{10}) = 0.0019U_{10}^{-1} + 0.0004 + 0.000067U_{10}.$$
 (7)

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Начальные этапы адаптации модели WW3 к условиям внутреннего водоема были приведены в работе [8]. Для корректной конфигурации модели в открытом программном коде было изменено минимальное значение высоты значительных волн

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 56 № 2 2020

Таблица 1. Таблица средних стандартных отклонений расчетов модели WW3 с подключением параметризаций нелинейных четырехволновых взаимодействий DIA, GMD при числе квадруплетов Q = 3, SNL3 при числе квадруплетов Q = 5, для тестового дня 14.07.2017

	DIA	GMD (Q = 3)	GMD (Q = 5)
$H_{\rm s}$	16%	17%	16%
T_r	9%	15%	14%

(*H_s*), для описания водоема была взята топографическая сетка Горьковского водохранилища размерностью 72 × 108 с шагом 0.00833°, данные NOAA "Global Land One-kilometer Base Elevation (GLOBE)". В связи с отсутствием надежных батиметрических данных по Горьковскому водохранилищу, находящихся в свободном доступе, а также с учетом того, что навигационные карты показывают, что глубины водохранилища достаточно большие, было выбрано приближение глубокой воды. Диапазон частот был изменен в соответствии с наблюдаемым в эксперименте диапазоном от 0.2 Гц до ≈ 3 Гц, который при моделировании дробился на 56 частот и задавался логарифмической формулой для роста частоты $\sigma_N = (\delta)^{N-1} \sigma_1$, где инкремент был установлен $\delta = 1.05$; разрешение по углам составляло 6.6(6) град. По заданным топографическим данным, данным о скорости и направлении ветра, разнице температур водавоздух моделировалось волнение в водохранили-

ше при заданном гауссовом начальном возмущении. Сравнение производилось для следующих выходных данных: одномерные спектры возвышений, высоты значительных волн, средний период волнения. Как в модели, так и в эксперименте расчет H_S производился по формуле:

$$H_S = 4\sqrt{m_0}.$$
 (8)

Средний период T_r вычислялся по формуле:

$$T_r = T_{m_{0,-1}} = \frac{m_{-1}}{m_0}.$$
 (9)

Здесь m_n — это *n*-ый момент плотности спектра возвышений S(f), определяемый по формуле:

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df.$$
 (10)

В координатах точки наблюдений были получены данные расчета, которые были усреднены в промежутке 15 мин для соответствия аналогично усредненным данным натурного эксперимента.

Как показано в работах [8, 9], применение новой параметризации (7) для $C_D(U_{10})$ повлияло на скорость роста волн за счет ветровой накачки, что позволило улучшить согласие данных H_S натурного эксперимента и численного моделирования. При этом модель по-прежнему предсказывала заниженные значения для среднего периода волнения Т_r. Это указывает на то, что модель предсказывает слишком медленную передачу энергии по спектру волнения, за которую отвечают четырехволновые нелинейные взаимодействия. С учетом этого было исследовано влияние представленных в WW3 v.5.16 параметризаций четырехволнового взаимодействия (DIA, GMD при количестве квадруплетов Q = 3, Q = 5) на предсказание средних параметров волнения в Горьковском водохранилище. Расчеты были проведены при использовании ветровой накачки WAM3 (далее ST1 в соответствии с [1]) [26, 27], которая была адаптирована к условиям коротких разгонов внутреннего водоема за счет изменения коэффициента аэродинамического сопротивления C_p [8].

Сравнение показывает существенное значение среднеквадратичного отклонения значительных высот и периодов волнения и при использовании параметризации DIA, и при параметризации GMD как с количеством квадруплетов Q = 3, так и Q = 5, причем для большего количества квадруплетов отклонение становилось больше (см. табл. 1). Среднеквадратичное отклонение расчетных данных от экспериментальных вычислялось по формуле:

$$std = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{(M_i - O_i)^2}{O_i^2}}.$$
 (11)

Здесь $M_i - i$ -ое значение расчетных данных, $O_i - i$ -ое значение экспериментальных данных.

Представленные параметризации нелинейного четырехволнового взаимодействия подстроены под условия морей и океанов. Для их применения к условиям внутренних водоемов средних размеров требуется подстройка параметров нелинейности. Дальнейший анализ и подстройка параметризации нелинейного переноса будет осуществлен на базе DIA. Параметризация DIA широко используется в оперативном моделировании, кроме того, она удобна с точки зрения модификации, поскольку в нее входят только два параметра (λ , *C*).

Для того, чтобы оценить чувствительность модели к изменению параметров нелинейности, были проведены расчеты WW3 (с подключением ветровой накачки ST1 и предложенным коэффициентом аэродинамического сопротивления C_D) при подключении модели DIA при нескольких наборах параметров: "дефолтные" (0.25, 2.78 × 10⁷), с изменением λ ((0.2, 2.78 × 10⁷), (0.4, 2.78 × 10⁷)) и с изменением C ((0.25, 5 × 10⁶), (0.25, 6 × 10⁷)). На рис. 3 показано влияние варьирования этих параметров на значение значительных высот и периодов волн. При возрастании параметра λ в 2 раза от $\lambda = 0.2$ до $\lambda = 0.4$ наблюдалось изменение периодов и высот значительных волн примерно в 1.3 ра-



Рис. 3. Чувствительность расчета средних параметров волнения в модели WW3 при изменении параметров схемы DIA, расчеты при подключении параметризации ST1 с измененным C_D и сравнение с экспериментом для тестового дня 14.07.2017.

за. При изменении параметра *C* на 1 порядок периоды изменялись примерно в 1.4 раза, а высоты волн изменялись незначительно.

Таким образом, параметризация нелинейности DIA чувствительна к изменению параметров и может быть подстроена за счет подбора "оптимальных" параметров, которые обеспечат наилучшее соответствие между расчетным и экспериментальным значениями высот и периодов волн. Для поиска "оптимальных" параметров схемы нелинейности DIA λ и C было проведено моделирование для двух измененных параметризаций ветровой накачки: ST1 и ST6 (параметризация BYDRZ, [28, 29, 24]). Обе параметризации были использованы с измененным авторами заданием коэффициента аэродинамического сопротивления С_D, данная адаптация описана в [8]. Была составлена программа оптимизации параметров (λ , *C*), минимизирующая отклонения предсказания модели от данных натурных измерений. При оптимизации был использован массив данных натурных измерений за 2016 и 2017 г., общая продолжительность временного ряда составила 47 ч в интервале скоростей ветра $U_{10} = 0.5 - 12.5$ м/с, параметров волн $H_s = 0.05 - 0.45$ м, $T_r = 0.5 - 2.8$ с (см. раздел "ОПИСАНИЕ НАТУР-НОГО ЭКСПЕРИМЕНТА"). В результате было получено распределение среднеквадратичного отклонения расчета модели DIA от экспериментальных данных. На рис. 4а показано распределение среднеквадратичного отклонения расчетного значения *H*_s от экспериментального, на рис. 46 – расчетного значения среднего периода T_r от экспериментального при использовании ветровой накачки ST1. Белым контуром выделена область с значениями среднеквадратичного отклонения, не превышающими 28% по значительным высотам

волн. Пунктирным контуром выделена область с 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.

Аналогичные расчеты при использовании другой параметризации ветровой накачки ST6 приведены на рис. 5. 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.

В пересечении областей минимальных значений отклонения расчета от эксперимента были выбраны точки, отвечающие "оптимальному" набору параметров DIA. Для модели ST1 параметры (λ , *C*) составили (0.29, 3.8 × 10⁷) вместо $(0.25, 2.78 \times 10^7)$. Для модели ST6 (λ , *C*) = (0.275, 3×10^7) вместо (0.25, 3×10^7). 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 Филипса" (схематично изображено на рис. 1), например, при использовании параметризации ветровой накачки ST1 с измененным C_D угол между волновыми векторами **k**₃ и **k**₁ изменился с 11.48° на 11.826°.

Влияние использования предложенных "оптимальных" параметров на расчет эволюции волне-



Рис. 4. Распределение среднеквадратичного отклонения расчета модели DIA от экспериментальных данных при подключении параметризации ST1 с измененным C_D для а) H_s , 6) T_r



Рис. 5. Распределение среднеквадратичного отклонения расчета модели DIA от экспериментальных данных при подключении параметризации ST6 с измененным C_D для а) H_s , 6) T_r

ния для тестового дня 14.07.2017 при использовании параметризации ветровой накачки ST1 представлено на рис. 6а, 6б. 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 были проведены при использовании параметризации ST6. В данном случае среднеквадратичное отклонения снизилось с 9 до 6% по периодам, а изменение среднеквадратичного отклонения по значительным высотам волн было меньше 1%.

На рис. 7 приведено сравнение спектров при использовании ветровой накачки ST1, иллюстрирующее характерное поведение модели. Оптимизация параметров DIA улучшила согласие значений рассчитанного спектра с результатами измерений. Использование оптимизированной DIA позволяет более точно воспроизводить пиковую частоту, а также высокочастотную асимптотику.



Рис. 6. Экспериментальные и расчетные данные значительных высот волн и средних периодов волнения для "дефолтной" версии DIA и для DIA с предложенными "оптимальными" параметрами для тестового дня 14.07.2017 при использовании ветровой накачки ST1 с измененным C_D , ST6 с измененным C_D , и при подключении параметризации нелинейных четырехволновых взаимодействий GMD при числе квадруплетов Q = 3, Q = 5.



Рис. 7. Одномерный спектр волнения в точке измерений для тестового дня 14.07.2017 (расчет и эксперимент) при ветровой накачке ST1 с измененным *C*_D.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена адаптация параметризации нелинейности для случая коротких разгонов в модели прогноза волнения WW3. Данная работа завершает начатую в [8, 9] модификацию модели WW3 для условий внутренних водоемов средних размеров.

Численное моделирование поверхностного волнения в условиях Горьковского водохранилища, проведенное с использованием встроенных в модель параметризаций нелинейности, показало неэффективность воспроизведения значительных высот и периодов волнения и при использовании параметризации DIA, и при параметризации Generalized Multiple DIA как с количеством квадруплетов Q = 3, так и с Q = 5, в сравнении с экспериментальными данными. Это обусловлено тем, что представленные методы расчета четырехволнового взаимодействия также, как и параметризации ветровой накачки, подстроены под условия морей и океанов. Для использования в vсловиях внутренних водоемов средних размеров была проведена подстройка 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 ST1 параметры (λ , *C*) составили (0.29, 3.8 × 10⁷) вместо (0.25, 2.78 × 10⁷), для модели ST6 – (0.275, 3 × 10⁷) вместо (0.25, 3 × 10⁷). Для DIA с предложенными "оптимальными" параметрами наблюдалось улучшения воспроизведения периодов моделью WW3 по сравнению с оригинальной DIA.

Нужно отметить, что для подтверждения универсальности данной подстройки требуется провести расчеты на акватории других водоемов средних размеров. Однако можно ожидать, что поведение модифицированной WW3 будет лучше соответствовать реальному волнению, чем WW3 с встроенными параметризациями, ориентирован-

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 56 № 2 2020

ными на морские или океанские условия, что наблюдалось для условий исследуемого Горьковского водохранилища.

Кроме того, было использовано приближение глубокой воды, в котором модель WAVEWATCH III рассматривает только нелинейные четырехволновые взаимодействия. Это направления для последующих исследований.

Программа подстройки модели нелинейности была создана при поддержке гранта РФФИ 18-35-00602. Проведение натурных измерений на полигоне Горьковского водохранилища было поддержано грантом РФФИ 17-05-41117. Работа по расчетам поверхностного волнения в рамках адаптированной модели WAVEWATCH III была частично поддержана грантом РФФИ 18-05-00292. Развитие методов моделирования осуществлено при поддержке гранта РФФИ 18-05-60299. Базовая заработная плата Байдакова Г.А., Сергеева Д.А. и Троицкой Ю.И. финансировалась в рамках государственного задания ИПФ РАН по теме № 0035-2019-0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- The WAVEWATCH III Development Group (WW3DG). User manual and system documentation of WAVE-WATCH III (R) version 5.16. // Tech. Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 2016. 326 p. + Appendices.
- SWAN team. SWAN user manual //Delft University of technology, Environmental Fluid Mechanics Section. 2006. 129 p.
- 3. *Gunter H., Hasselmann S., Janssen P.A.E.M.* The WAM model cycle 4 // DKRZ WAM Model Documentation. Hamburg. 1992. 101 p.
- 4. https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model
- 5. https://www.ecmwf.int/
- Donelan M.A., Dobson F.W., Smith S.D., Anderson R.J. On the Dependence of Sea Surface Roughness on Wave Development // Phys. Oceanogr. 1993. V. 23. P. 2143– 2149.
- Komen, Gerbrand J. et al. "Dynamics and modelling of ocean waves" Dynamics and Modelling of Ocean Waves, by GJ Komen and L. Cavaleri and M. Donelan and K. Hasselmann and S. Hasselmann and PAEM Janssen, pp. 554. ISBN 0521577810. Cambridge, UK: Cambridge University Press, August 1996. (1996): 554.
- 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 WAVE-WATCH III Model for the Middle-Sized Water Body on the Basis of the Field Experiment // Adv. in Meteor. 2016. V. 1. article ID 574602. P. 1–13.
- 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.

- Kahma, Kimmo K., Charles J. Calkoen. "Reconciling discrepancies in the observed growth of wind-generated waves" J. Physical Oceanography 22.12.1992. P. 1389– 1405.
- Phillips O.M. On the dynamics of unsteady gravity waves of finite amplitude // J. Fluid Mech. 1960. V. 9. P. 193–217.
- 12. *Hasselmann K*. On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum Part 1. General theory // J. Fluid Mech. 1962. V. 12. P. 481–500.
- Zakharov V.E., Badulin S.I., Geogjaev V.V., Pushkarev A.N. Weak-turbulent theory of wind-driven sea // Earth and Space Science. 2019. V. 6.
- 14. *Herterich, K., Hasselmann K.* A similarity relation for the nonlinear energy transfer in a finite-depth gravity-wave spectrum // J. Fluid. Mech. 1980. V. 97. P. 215–224.
- 15. Van Vledder G.Ph. Efficient algorithms for computing non-linear four-wave interactions // ECMWF Workshop on Ocean Waves. 25–27 June 2012.
- Hasselmann S., Hasselmann K. Computations and Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity-Wave Spectrum. Part I: A New Method for Efficient Computations of the Exact Nonlinear Transfer Integral // J. Phys. Oceanogr. 1985. V. 15. P. 1369–1377.
- Hasselmann S., Hasselmann K., Allender J.H., Barnett T.P. Computations and Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity-Wave Specturm. Part II: Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer for Application in Wave Models // J. Phys. Oceanogr. 1985. V. 15. P. 1378–1391.
- Hashimoto N., Kawaguchi K. Extension and Modification of Discrete Interaction Approximation (DIA) for Computing Nonlinear Energy Transfer of Gravity Wave Spectra // Proc. 4th Int. Symp. on Ocean Waves, Measurement & Analysis. WAVES 2001.
- Tracy B., Resio D.T. Theory and calculation of the nonlinear energy transfer between sea waves in deep water // WES Report 11. 1982. US Army Engineer. Waterways Experiment Station, Vicksburg.
- Resio D. T., Perrie W. A numerical study of nonlinear energy fluxes due to wave-wave interactions Part 1. Methodology and basic results // J. Fluid Mech. 1991. V. 223. P. 609–629.
- 21. *Tolman H.L.* A genetic optimization package for the Generalized Multiple DIA in WAVEWATCH III R. // Tech. Note 289, NOAA/NWS/NCEP/MMAB. 2010. Ver. 1.0.
- Resio D.T., Perrie W. A Two-Scale Approximation for Efficient Representation of Nonlinear Energy Transfers in a Wind Wave Spectrum. Part II: Application to Observed Wave Spectra // J. Phys. Oceanogr. 2009. V. 38. № 12. P. 2801–2816.
- Perrie W., Toulany B., Resio D.T., Roland A., Auclair J.-P. A two-scale approximation for wave–wave interactions in an operational wave model // Ocean Mod. 2013. V. 70. P. 38–51.
- Hwang P.A. A Note on the Ocean Surface Roughness Spectrum // J. Atmos. Oceanic Techn. 2011. V. 28. P. 436–443.
- 25. Fairall C.W., Bradley E.F., Hare J.E., Grachev A.A., Edson J.B. Bulk Parameterization of Air–Sea Fluxes: Up-

dates and Verification for the COARE Algorithm // J. Climate. 2003. V. 16. № 4. P. 571–591.

- Snyder R.L., Dobson F.W., Elliott J.A., Long R.B. Array measurement of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves // J. Fluid Mech. 1981. V. 102. P. 1–59.
- Wu J. Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. № 9. P. 704–9.706.
- Donelan M.A., Babanin A.V., Young I.R., Banner M.L. Wave-Follower Field Measurements of the Wind-Input Spectral Function. Part II: Parameterization of the Wind Input // J. Phys. Oceanogr. 2006. V. 36. P. 1672–1689.
- Babanin A.V., Banner M.L., Young I.R., Donelan M.A. Wave-Follower Field Measurements of the Wind-Input Spectral Function. Part III: Parameterization of the Wind-Input Enhancement due to Wave Breaking // J. Phys. Oceanogr. 2007. V. 37. P. 2764–2775.

Adaptation of the Nonlinear Wave-Wave Interaction Parameterization for the Short Fetches Conditions in the Wave Prediction Model WAVEWATCH III

A. M. Kuznetsova^{1, *}, A. S. Dosaev¹, G. A. Baydakov¹, D. A. Sergeev¹, and Yu. I. Troitskaya^{1, 2}

¹Institute of Applied Physics RAS, Uljanova st., 46, Nizhny Novgorod, 603950 Russia

²Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences, Pyzhyovskiy In, 3, Moscow, 119017 Russia *e-mail: alexandra@ipfran.ru

In the WAVEWATCH III wave model, the nonlinear energy transfer parameterization Discrete Interaction Approximation (DIA) was optimized using the criterion of minimizing deviations of model predictions from field measurements. The case of short fetches was considered, for which the function of the wind input source was previously tuned. The results of the numerical simulation using the built-in version of the DIA and the DIA with the proposed parameters, and the field experiment are compared. The improvement of model reproduction of the main parameters of the wave spectra, significant wave height and average period is shown.

Keywords: surface waves, wind wave interaction, modeling, WAVEWATCH III, nonlinear wave-wave interactions, short fetches