

УДК 551.466.31

© К. Ю. Булгаков^{1,2}, Я. В. Стригунова²

¹Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН

²Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург
bulgakov.kirill@gmail.com

СХЕМА РАСЧЕТА ПРИТОКА ЭНЕРГИИ ОТ ВЕТРА К ВОЛНАМ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА ВЕТРОВЫХ ВОЛН

Статья поступила в редакцию 21.03.2017, после доработки 10.05.2017.

Обосновывается необходимость формулировки новых схем расчета притока энергии от ветра к волнам, предназначенных для включения в модели прогноза ветровых волн. Описывается схема, основанная на линейной теории Майлза, которая связывает Фурье-компоненты поверхностного давления с Фурье-компонентами возвышения через так называемую бета-функцию. Бета-функция представляется как зависимость от отношения скорости ветра на высоте половины волны к фазовой скорости моды для данного волнового числа. Приводится аппроксимация бета-функции, полученная по данным статистической обработки результатов прямого совместного моделирования волн и приповерхностного слоя атмосферы. Показаны результаты испытания данного метода в модели прогноза ветровых волн WAVEWATCH, которая была адаптирована для региона Балтийского моря. Описывается система прогноза морских волн WAVEWATCH/WRF. Данной системой был проведен эксперимент по воспроизведению шторма, который наблюдался 18—22 августа 2014 г. Приводятся результаты экспериментов, а также сравнение результатов с данными наблюдений, полученных с буя FMI. Показано, что модель прогноза ветровых волн с внедренной в неё предложенной схемой успешно воспроизвела эволюцию волнения.

Ключевые слова: ветровые волны, моделирование, приток энергии от ветра.

K. Yu. Bulgakov^{1,2}, Y. V. Strigunova²

¹Saint-Petersburg Branch of the P. P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Russia

²Russian State Hydrometeorology University, Saint-Petersburg, Russia

WIND INPUT SCHEME FOR WAVE FORECAST MODEL

Received 21.03.2017, in final form 10.05.2017.

The importance of the formulation of new calculation schemes of energy inflow from wind to waves intended for inclusion in forecasting models of wind waves is proved. The scheme based on Miles linear theory which connects Fourier components of superficial pressure with Fourier components of an eminence through so-called beta-function is described. The beta-function is presented as the dependence on the wind speed relation at height of a half of a wave to the phase speed of mode for this wave number. The approximation of beta-function received according to data of statistical processing of results of direct joint simulation of the waves and ground-level layer of the atmosphere is presented. The test results of the method in the model of forecast of wind waves WAVEWATCH, which was adapted for the Baltic sea region are shown. The system of the forecast of sea waves WAVEWATCH/WRF is described. This system was used for the experiment on the storm reproduction which was observed in August 18—22 2014. The results of the experiments as well as the comparison of results with the observations data received from FMI buoy are given. It is shown that the forecast model of wind waves with the offered scheme introduced in it has successfully reproduced nervousness evolution.

Key words: wind waves, modeling, wind input.

Ссылка для цитирования: Булгаков К. Ю., Стригунова Я. В. Схема расчета притока энергии от ветра к волнам для моделей прогноза ветровых волн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 2. С. 20—24.

For citation: Bulgakov K. Yu., Strigunova Y. V. Wind input scheme for wave forecast model. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2017, 10, 2, 20—24.

DOI: 10.7868/S2073667317020034.

Прогнозирование морских волн является важной задачей геофизической гидромеханики, необходимой для обеспечения безопасности морских судов, а также для проектирования береговых и шельфовых сооружений. Несмотря на это, многие элементы прогнозирования морских волн до сих пор находятся в зачаточном состоянии. Прежде всего, это относится к схемам притока энергии от ветра к волнам и диссипации энергии волн в турбулентность. Стоит заметить, что вышеуказанные схемы являются определяющими для успешности прогноза ветровых волн. Сложности с построением параметризаций притока энергии к волнам вполне очевидны. Отсутствует достаточное количество наблюдений для исследования циркуляции в приволновом слое. Теоретические работы в этой области ограничиваются, в основном, рассмотрением идеализированных случаев. Поэтому работоспособность большинства схем определяют подгоночные коэффициенты, настраивая которые можно добиться удовлетворительного результата.

Неудивительно, что до сегодняшнего дня нет единого подхода к построению схем притока энергии от ветра к волнам. Так, например, модель прогноза ветровых волн UMWM [1] использует схему на основе [2, 3]. Приток энергии определяется отношением фазовой скорости волн и скорости ветра и так называемым коэффициентом перекрытия (*sheltering coefficient*), который определяет часть волны, закрытую от воздействия ветра. В модели SWAN [4] приток энергии разделяется на линейную составляющую и экспоненциальную. Линейная часть принимается равной для всего спектра волн, распространяющихся в одном направлении, и определяется величиной динамической скорости (с учетом различных множителей), экспоненциальная часть зависит как от направления волны (от разницы между направлением движения волны и направлением ветра), а также от волнового числа. Величина притока определяется отношением динамической скорости и фазовой скорости волны. Модель WAVEWATCH [9, 10] применяет для расчета притока энергии теорию Майлса [8], которая будет описана ниже.

Наиболее перспективным методом исследования проблемы взаимодействия волн и ветра надо считать метод, основанный на прямом численном моделировании совместной динамики волн и ветра. Реализация данного метода сопряжена со значительными трудностями. Необходимо введение отслеживающих координат, связанных с нестационарной поверхностью (волнами). В трехмерном случае такая система координат не будет ортогональной, поэтому с её введением уравнения приволнового слоя атмосферы значительно усложняются. Например, для расчета давления на поверхности необходимо решать полное уравнение эллиптического типа, что требует больших затрат машинного времени при счете, не говоря уже про сложности в программной реализации. Неудивительно, что до настоящего времени не было разработано ни одной трехмерной модели совместной динамики ветра и волн.

Двухмерность (x, z) значительно упрощает проблему, позволяя использовать ортогональные конформные координаты [5, 6]. Задача эволюции потенциальных волн в этой системе сводится в одномерную. Уравнение для расчета давления становится уравнением Пуассона. Такая модель была реализована в [7]. Она включает в себя систему одномерных уравнений для потенциальных волн, и систему уравнений для двумерного пограничного слоя атмосферы в негидростатическом приближении с турбулентным замыканием на основе уравнения эволюции кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации. Уравнения имеют безразмерный вид. На основе полученных с её помощью результатов, был разработан нижеприведенный алгоритм расчета притока энергии и импульса от ветра к волнам.

Определение β -функции. Линейная теория Майлза [8] рассматривает развитие волн, обусловленное неустойчивостью потока в сопряженной системе вода-воздух. Этот сопряженный механизм ведет к экспоненциальному росту энергии волн (S), по следующему закону:

$$\frac{dS}{dt} = \beta.$$

С другой стороны, Фурье-компоненты поверхностного давления p могут быть связаны с Фурье-компонентами возвышения (h) следующей зависимостью:

$$p_k + ip_{-k} = (\beta_k + i\beta_{-k})(h_k + ih_{-k}),$$

где β_k, β_{-k} — реальная и мнимая части комплексной функции β (т. е. реальные Фурье-коэффициенты при COS и SIN соответственно). Из линейной теории также следует, что оба коэффициента являются функциями безразмерной частоты $\Omega = \omega_k U$ (где U — безразмерная скорость ветра.). Поскольку ветер

меняется с высотой, резонно предположить, что значение скорости ветра должно быть различным для разных частот, следовательно, безразмерная частота Ω должна быть определена, например, так:

$$\Omega = \omega_k U (\lambda_k / 2) = U (\lambda_k / 2) / c_k, \quad (1)$$

где ω_k — $|k|^{1/2}$ безразмерная частота; c_k — фазовая скорость k -ой моды; U — скорость ветра на высоте $\lambda_k/2$, где $\lambda_k = 2\pi/k$ длина k -ой моды.

Функция β была определена в широком интервале безразмерной частоты Ω . Для достижения этой цели было проведено 47 долгопериодных (вплоть до нескольких сотен периодов волны пика) расчётов совместной эволюции волн и ВПС для различных скоростей ветра. Скорость ветра была задана путем выбора различных значений напряжения трения на верхней границе приволнового слоя направленного как вдоль, так и против движения волн. Заметим, что волновая модель генерирует также волны направленные обратно основному направлению волн, но их вклад в энергию волнового поля очень незначителен. Каждый расчёт для конкретного значения Ω_p генерировал необходимый объем данных для вычисления функции $\beta(\Omega)$ в пределах интервала $[\Omega_{\min}, \Omega_{\max}]$.

Данные о поверхности и поверхностном давлении полученные в счёте записывались с интервалом, превышающим радиус временной автокорреляции волновых возмущений. Общее число моментов времени, для которых были произведены записи, равно 27802. После преобразования Фурье первые 50 коэффициентов для p и h использовались для расчета β -функции. Общее число точек попавших в интервал $-50 < \Omega < 50$ было равно 1390100. Для оценки значений β этот интервал был разбит на 100 промежутков шириной $\delta\Omega = 0.1$. Число точек попавших в каждый интервал превышало 1000.

Функция β была аппроксимирована следующим выражением:

$$\beta_{-k} = \begin{cases} b_1 + d_1 (\Omega - \Omega_1) & \Omega < \Omega_1 \\ b_0 + a_0 (\Omega - \Omega_0) + a_1 (\Omega - \Omega_0)^2 & \Omega_1 \leq \Omega < \Omega_2 \\ b_2 + d_2 (\Omega - \Omega_2) & \Omega \geq \Omega_2 \end{cases}, \quad (2)$$

$$\beta_k = \begin{cases} b_1 + d_1 (\Omega - \Omega_1) & \Omega < \Omega_1 \\ b_0 + a_0 (\Omega - \Omega_0) + a_1 (\Omega - \Omega_0)^2 & \Omega_4 \leq \Omega < \Omega_5 \\ b_2 + d_2 (\Omega - \Omega_2) & \Omega \geq \Omega_5 \end{cases},$$

где численные параметры равны:

$$\begin{aligned} \Omega_0 &= 0.7, \Omega_1 = -19.3, \Omega_2 = 20.7, \Omega_3 = 1.2, \Omega_4 = -18.8, \Omega_5 = 21.2, \\ a_0 &= 0.02277, a_1 = 0.09476, a_3 = -0.3718, b_0 = -0.02, b_1 = 37.43, b_2 = 38.24, \\ b_3 &= -141.0, b_4 = 0.07, d_1 = -3.768, d_2 = 3.813, d_3 = 14.80. \end{aligned} \quad (3)$$

Функция β используется для расчёта потока импульса F и энергии E в спектральном интервале $\Delta\omega$:

$$F(\omega) = gk\beta_{-k}(\Omega)S(\omega)\Delta\omega, \quad E(\omega) = g\omega\beta_{-k}(\Omega)S(\omega)\Delta\omega, \quad (4)$$

где k — размерное волновое число; ω — частота; S — размерная спектральная плотность. Зависимости (4) следуют из теории малой амплитуды. Применимость (4) к волнам конечной амплитуды никогда не обсуждалась. Заметим также, что выражение для расчета спектрального потока энергии $E(\omega)$ было получено из первичного выражения для спектрального потока импульса $F(\omega)$ с использованием дисперсионного соотношения $\omega = \sqrt{gk}$. Дисперсионное соотношение для низкочастотных волн довольно точно, оно заметно искажается для волн с частотой равной нескольким частотам волнового пика, а на высоких частотах связь между частотой и волновым числом отсутствует совсем. Такой недостаток характерен для всех схем, основанных на теории из [8]. Данные случаи могут быть предметом отдельных исследований.

Испытание схемы притока энергии и импульса к волнам. Алгоритм (1)—(4) был внедрен в модель прогноза ветровых волн WAVEWATCH 3.0 [9] как замена имеющейся бета-функции. Данная модель была применена к Балтийскому морю. Настройки модели для данного водоема были взяты из [10]. Горизонтальное разрешение модели — 10 км, разрешение направления волн — 24 равных сегментов,

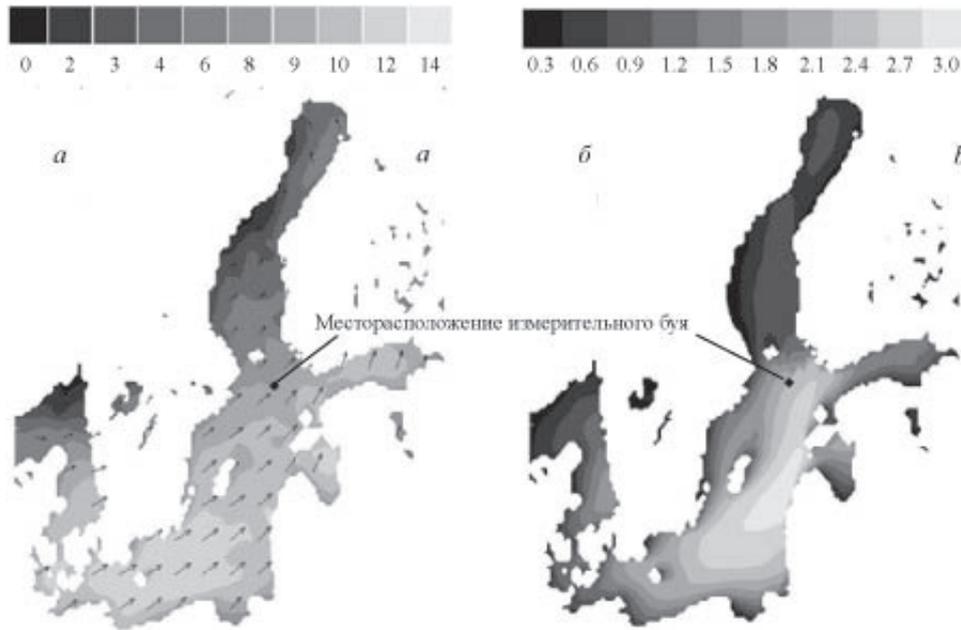


Рис. 1. Результаты эксперимента с моделью WAVEWATCH, в которую внедрен алгоритм (1)—(4). *a* — средняя скорость ветра на высоте 10 м за период 18—22 августа 2014 г., рассчитанная моделью, стрелками показано направление; *b* — средняя высота доминантной волны за период 18—22 августа 2014 г., рассчитанная моделью. Черным ромбом отмечено месторасположение измерительного буя (Nothern Baltic sea buoy).

Fig. 1. The results of the experiment with model WAVEWATCH containing algorithm (1)—(4). *a* — the average speed of wind at the height of 10 m during August 18—22, 2014; *b* — the average height of a dominant wave during August 18—22, 2014 calculated by the model. The location of a measuring buoy is marked by the black rhombus (Nothern Baltic sea buoy).

спектральное разрешение — 25 интервалов, значение наименьшей частоты первого интервала — 0.04 Гц. Значение следующих границ интервалов определялись как

$$\omega_{i+1} = \gamma \omega_i, \gamma = 1.1.$$

В качестве начальных условий задавалось отсутствие волнения.

Поля ветра рассчитывались адаптированной для данного региона моделью региональной циркуляции атмосферы WRF [11]. Расчеты проводились на 3-х последовательно вложенных сетках разрешением

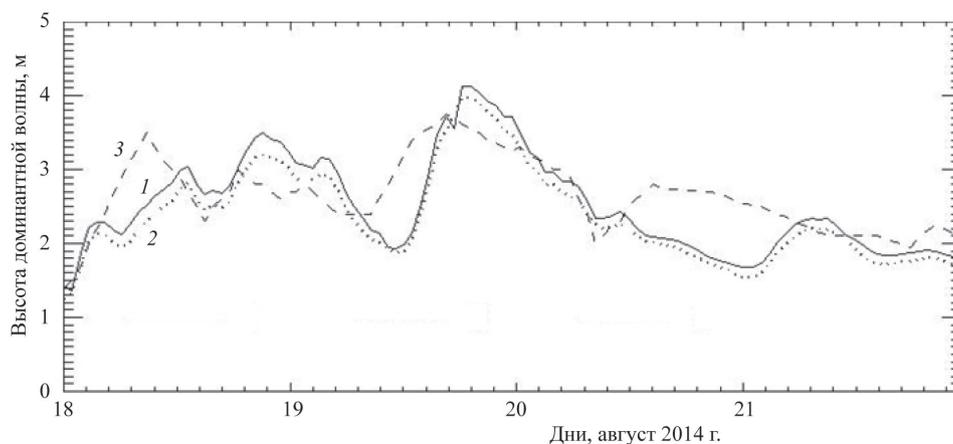


Рис. 2. Эволюция высоты доминантной волны по данным наблюдений и воспроизведенная моделью. 1 — результаты эксперимента с алгоритмом притока энергии (1)—(4); 2 — результаты эксперимента с базовым вариантом модели, 3 — данные наблюдений.

Fig. 2. The evolution of significant wave height by observation and by the model. To abscissas axis — days in August, to ordinates axis — significant wave height in meters. Curve 1 — results of experiment by algorithm of influx of energy (1)—(4); curve 2 — the results of the experiment with base variant model; curve 3 — the observed data.

90 (количество точек — 40×39), 30 (67×64) и 10 км (130×139). Узлы последней сетки совпадали с узлами сетки WAVEWATCH, поэтому обмен полями в процессе расчета не требовал дополнительной интерполяции данных. Для начальных и боковых граничных условий модели WRF были использованы поля реанализа NCEP [12].

Было проведено 2 эксперимента по воспроизведению шторма, наблюдавшегося с 18 по 22 августа 2014 г. В первом эксперименте применялся алгоритм (1)—(4), во втором был использован базовый вариант модели, схема притока энергии которого описана в [13].

На рис. 1 показаны скорость ветра и высота доминантной волны (*significant wave height*), полученные в результате 1-го эксперимента. Область максимальной скорости ветра находится юго-западнее области максимальной высоты, что совпадает с направлением ветра. Соотношение высоты волн и скорости ветра приблизительно 0.2—0.4. Можно говорить о том, что модель качественно воспроизвела волновое поле. К эпицентру шторма наиболее близко расположен измерительный буй FMI с координатами 59° с.ш., 20° в.д. (показан на рисунке черным ромбом).

На рис. 2 показано изменение доминантной высоты волны по данным измерений на этом бую и по результатам экспериментов. Можно сказать, что результаты экспериментов примерно одинаковы, модель со схемой (1)—(4) показывает большую высоту волны, чем базовый вариант модели. Наибольшая разница между результатами примерно 0.4 м. В целом можно говорить о том, что предложенная схема работает не хуже, чем схема базового варианта модели.

В работе приведена схема притока энергии от ветра к волнам, разработанная в [7]. При построении схемы впервые использовался метод, основанный на прямом моделировании волн и ветра. Такой метод представляется наиболее физически обоснованным и перспективным. Модель прогноза ветровых волн с внедренной в нее схемой успешно воспроизвела шторм на Балтийском море. Полученная разница с данными наблюдений не превышает ошибки в результатах с использованием других схем. Надо отметить, что авторы не проводили дополнительной калибровки схемы, хотя такие процедуры проводятся с целью улучшения качества работы модели.

Авторы благодарят профессора Д. В. Чаликова за помощь и консультации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-17-00124).

Литература

1. Donelan M. A., Curcic M., Chen S. S., Magnusson A. K. Modeling waves and wind stress // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. P. 1—26.
2. Jeffreys H. On the formation of waves by wind // Proc. R. Soc. A. 1924. V. 107. P. 189—206.
3. Jeffreys H. On the formation of waves by wind II // Proc. R. Soc. A. 1925. V. 110. P. 341—347.
4. Holthuijsen L. H., Booij N., Ris R. C. A spectral wave model for the coastal zone // Proc. 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis. New Orleans. July 25—28. 1993. New York. P. 630—641.
5. Chalikov D., Sheinin D. Direct Modeling of One-dimensional Nonlinear Potential Waves // Advances in Fluid Mechanics. 1998. V. 17. P. 207—258.
6. Chalikov D., Sheinin D. Modeling of Extreme Waves Based on Equations of Potential Flow with a Free Surface // Journ. Comp. Phys. 2005. V. 210. P. 247—273.
7. Chalikov D., Rainchik S. Coupled numerical modeling of wind and waves and the theory of the wave boundary layer // Boundary Layer Meteorol. 2010. V. 138. Iss. 1. P. 1—41.
8. Miles J. W. On the generation of surface waves by shearflows // J. Fluid Mech. 1957. V. 3. Iss. 2. P. 185—204.
9. Tolman H. L. A third generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents // J. Phys. Oceanogr. 1991. V. 21. P. 782—797.
10. Street I. S. Modeling the wave climate in the Baltic sea // Journal of Water Management and Research. 2014. V. 70. P. 19—29.
11. Michalakes J., Dudhia J., Gill D., Henderson T., Klemm J., Skamarock W., Wang W. The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance // Proceedings of the 11th ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing In Meteorology, 25—29 October 2004, Reading U.K. Ed. George Mozdzynski.
12. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce, NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO. 2000. P. 11—14. URL: <http://dx.doi.org/10.5065/D6M043C6>. (Дата обращения: 10.07.2015).
13. Tolman H. L., Chalikov D. V. Source terms in a third-generation wind-wave model // J. Phys. Oceanogr. 1996. V. 26. P. 2497—2518.