

Модель Ветровой Накачки Волнения ST6: Оценка и Альтернативы

А. Н. Пушкарев, В. В. Геогджаев, В. Е. Захаров

XXXI Научная сессии Совета РАН по нелинейной динамике

2022

Abstract:

Проведено исследование модели ST6 для ветровой накачки поверхностных волн, используемой в расчётных моделях.

Исследование базируется на параметрах автомодельности волнового спектра и на численных расчётах. На базе этих расчётов предложена новая модель ветровой накачки (модель ZRP) обеспечивающая лучшее приближение к автомодельности.

Баланс Энергии

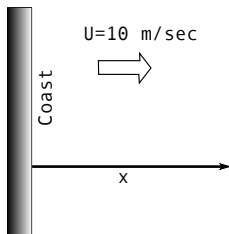
$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{k}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{r}} = S_{\text{nl}} + S_{\text{in}} + S_{\text{ds}}$$

S_{nl} — нелинейное взаимодействие волн. Описывается кинетическим уравнением.

S_{in} — ветровая накачка. Точное математическое описание отсутствует, используются эмпирические модели.

S_{ds} — диссипация. Используются эмпирические модели.

Пространственное развитие волнения



$$\frac{1}{2} \cos \theta \frac{\omega}{k} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = S_{nl} + S_{in} + S_{ds}$$

Магическое Соотношение

Уравнение

$$\frac{1}{2} \frac{\omega}{k} \cos \theta \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = S_{nl} + S_{in}$$

допускает автомодельное решение

$$\epsilon(\omega, \theta, x) = x^{p+q} F(\omega x^q, \theta)$$

$$10q - 2p = 1$$

$$q = \frac{1}{2+s}$$

Модель ST6

FEBRUARY 2019

LIU ET AL.

491

models (e.g., Hasselmann et al. 1988; Tolman 1991). It however also has some well-known shortcomings as an approximation (see an extended discussion about this issue in section 2b). To investigate the errors in spectral wave models attributable to the DIA, we first specifically optimize another more accurate nonlinear solver, that is, the Generalized Multiple DIA (GMD; Tolman 2013) for ST6, and then conduct a thorough comparison of model simulations with these two different nonlinear solvers. The most prominent advantage of the GMD-based model over the DIA-based model, as later illustrated in this paper, is that the former shows a much higher accuracy in simulating the energy of long-period waves ($T > 16$ s). The computational expense of the GMD approach used here, however, is about 5 times larger than that of the DIA.

This paper is organized as follows. Section 2 provides a brief overview of ST6 source functions ($S_{in} + S_{in} + S_{out}$) and the four-wave resonant interactions S_{4D} . Section 3 describes the updates of ST6 over its predecessor, particularly focusing on the nesting procedure. Section 4 presents a detailed analysis of modeled wave spectra from duration-limited simulations, followed by a thorough validation of model performance with a 1-yr global hindcast in section 5. Conclusions in section 6 finalize this paper.

2. Parameterization

a. ST6 source term package

A brief overview of the ST6 source terms is given here for completeness. The reader is referred to RBW12 and ZBRV13 and references therein for more details.

1) WIND INPUT S_{in}

The wind input parameterization S_{in} , formulated by Donelan et al. (2006), is given as follows:

$$S_{in}(k, \theta) = \frac{\rho_a}{\rho_w} \sigma(k) \gamma(k, \theta) W^3(k, \theta), \quad (3)$$

$$G(k, \theta) = \mu_1 - \mu_2 \left[1 + \tanh \left[\rho_w \sqrt{|B(k)|} W^2(k, \theta) - \mu_3 \right] \right], \quad (4)$$

$$\gamma(k, \theta) = \alpha_w G(k, \theta) \sqrt{|B(k)|} W^3(k, \theta), \quad (5)$$

where ρ_w and ρ_a are air and water densities, $W(k, \theta) = U_s \cos(\theta - \theta_w) \gamma(k) - 1$ is the wind forcing parameter, U_s is the scaling wind speed, $c(k) = \sigma k$ is the phase velocity, and $B(k) = B(k) A(k)$ is a spectral measure of wave steepness—the saturation spectrum $B(k) = k^{-4} P(k)$

(Phillips 1984) normalized by the spreading function $A(k) [c(k)]$ (Babinn and Soloviev 1988). Also, $G(k, \theta)$ represents the degree of flow separation (whether the full separation occurs or not) and α_w is the wind growth parameter:

$$\alpha_w = \begin{cases} 1, & \text{for } W(k, \theta) \geq 0 \\ -\alpha_s, & \text{for } W(k, \theta) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Here α_s is a tuning parameter controlling the strength of negative wind input (ZBRV13; Liu et al. 2017, and references therein). The specific values of the four parameters μ_i , $i = 1, \dots, 4$ vary with the scaling wind speed U_s , adopted in $W(k, \theta)$. For $U_s = U_{10}$, Donelan et al. (2006) suggested

$$\mu_1 = 2.8, \quad \mu_2 = 1.0, \quad \mu_3 = 10, \quad \text{and} \quad \mu_4 = 11.$$

The wave model community, however, prefers α_w scaling in order to assure a consistent fetch law across different wind speeds (Komen et al. 1994, p. 252), where u_* is the friction velocity. Therefore, RBW12 advocated using an approximation

$$U_s = U_{10} \approx U_{10}, \quad \text{and} \quad Y = 28 \quad (7)$$

by following Komen et al. (1984).

2) WAVE BREAKING S_{in}

The wave breaking parameterization S_{in} of the ST6 package incorporates two different mechanisms: 1) the inherent wave breaking $T_1(k, \theta)$ occurring at each frequency once the steepness of that wave component exceeds a threshold value (Banner et al. 2008; Babinn et al. 2010) and 2) the induced breaking of relatively short waves $T_2(k, \theta)$ due to the modulation of longer waves (Donelan 2011; Young and Babinn 2006). The source terms read (RBW12; ZBRV13)

$$S_{in}(k, \theta) = T_1(k, \theta) + T_2(k, \theta), \quad (8)$$

$$T_1(k, \theta) = -\alpha_1 \left[\frac{\Delta(k)}{F_1(k)} \right]^{p_1} F_1(k, \theta), \quad \text{and} \quad (9)$$

$$T_2(k, \theta) = -\alpha_2 \int_{k_1} \left[\frac{\Delta(k)}{F_1(k)} \right]^{p_2} dF_1(k, \theta), \quad (10)$$

where α_1 , α_2 , p_1 , and p_2 are tunable parameters, f_{max} is the lowest discrete frequency defined in the spectral grid, $F_1(k) = B_1(k)^2$ is the spectral threshold, $B_1 = 0.035^2$ is the dimensionless saturation-threshold value, and $\Delta(k) = F(k) - F_1(k)$ is the exceedance level (Babinn et al. 2010). RBW12 found that highly nonlinear T_1 and T_2 are required to balance the strong wind

Расчёты

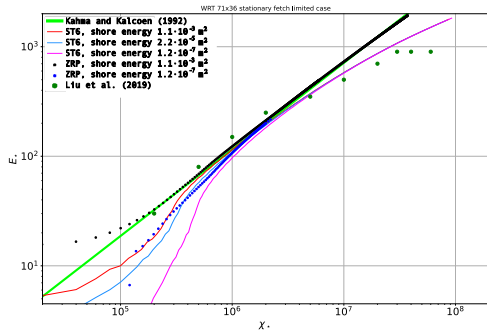
Liu et al. (2019) выполнил численные эксперименты по модели ST6 используя численную модель WAVEWATCH III.

Мы воспроизвели эти эксперименты используя наш алгоритм.

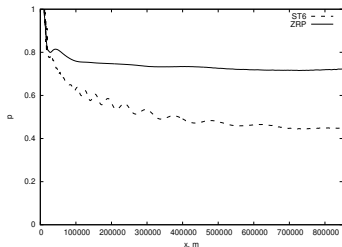
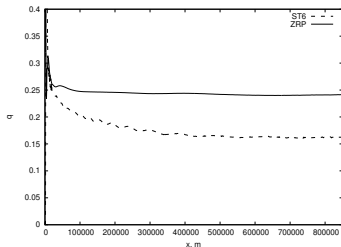
Для настройки модели использовались экспериментальные данные Kahma and Calkoen (1992)

$$\varepsilon_* = \frac{H_s^2 g^2}{16u_*^4} = 2.1 \cdot 10^{-3} \chi_*^{0.79}$$

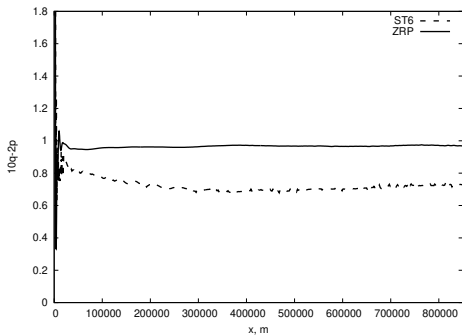
where $H_s = 4\sqrt{E}$ is significant wave height, E is the total energy, $\chi_* = gx/u_*^2$ is dimensionless fetch, $u_* = U_{10}/\Gamma$ is friction velocity, $\Gamma = 31$.



Значения автомодельных параметров

 ρ  q

Магическое значение



$$10q - 2p$$

Модель ZRP

$$S_{\text{in}}^{\text{ZRP}}(\omega, \theta) = \gamma(\omega, \theta) \cdot \varepsilon(\omega, \theta)$$

$$\gamma(\omega, \theta) = \begin{cases} A \frac{\rho_{\text{air}}}{\rho_{\text{water}}} \omega \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^5 q(\theta) & \text{for } f_{\text{min}} \leq f \leq f_d, \quad \omega = 2\pi f \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$q(\theta) = \begin{cases} \cos^2 \theta & \text{for } -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\omega_0 = \frac{g}{U_{10}}, \quad \frac{\rho_{\text{air}}}{\rho_{\text{water}}} = 1.3 \cdot 10^{-3}$$

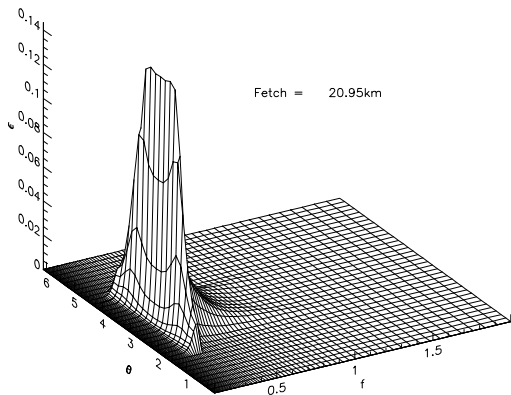
$$f_{\text{min}} = 0.1 \text{ Hz} \quad f_d = 1.1 \text{ Hz}$$

Настройка модели ZRP

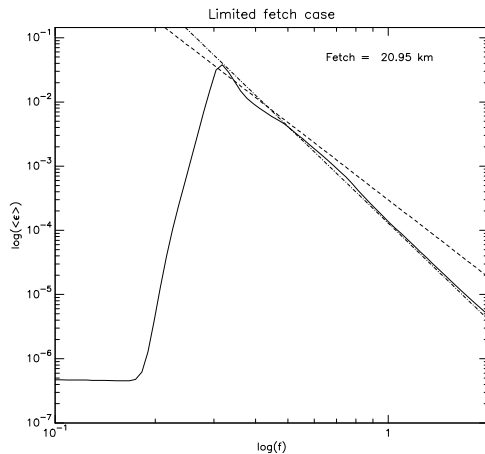
Настроечными параметрами модели являются интенсивность ветровой накачки A и степенной параметр s

Наилучшее соответствие экспериментальным данным обеспечивается при

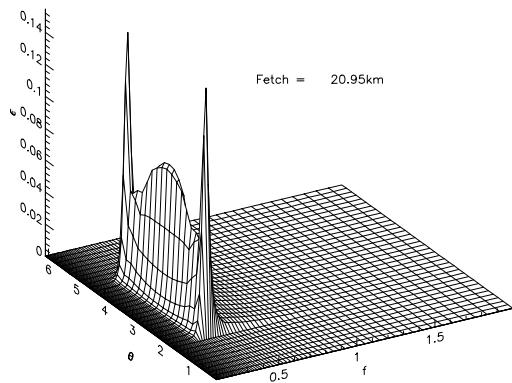
$$A = 0.0089, \quad s = 2.2$$



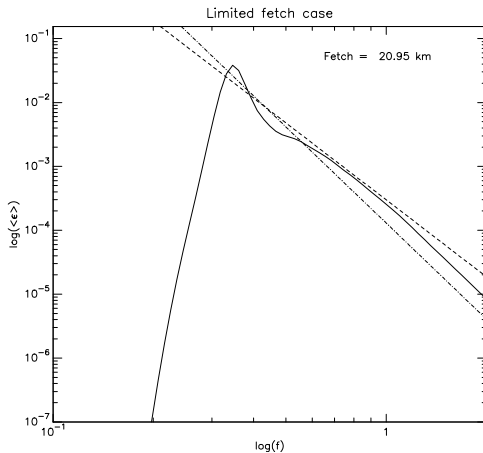
Энергетический спектр ε как функция частоты ω и угла θ для накачки ST6



Энергетический спектр ϵ , усреднённый по углу, для накачки ST6



Энергетический спектр ε как функция частоты ω и угла θ для накачки ZRP



Энергетический спектр ϵ , усреднённый по углу, для накачки ST6

Выводы

Модель ST6 дает квази-автомодельные результаты на разгонах от $\simeq 5$ до $\simeq 50$ км. Однако соотношение для "магического значения" не соблюдается.

Мы построили новую модель ветровой накачки и диссипации, имеющую в качестве настроечных параметров амплитуду и степенной показатель ветровой накачки. Эти параметры были выбраны исходя из сравнения результатов модели с экспериментальными данными.

Новая модель даёт более хорошее согласование с экспериментом, особенно на разгонах менее 5 км.

Мы планируем продолжить настройку и развитие нашей модели.

Спасибо за внимание!