

С.Ю.Михайличенко, А.В.Гармашов, В.В.Фомин

Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

**ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ SWAN
ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА СТАЦИОНАРНОЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ
ПЛАТФОРМЕ ЧЕРНОМОРСКОГО ГИДРОФИЗИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА РАН**

Проводится верификация спектральной волновой модели *SWAN* для акватории Голубого залива (пгт.Кацивели). В качестве натуральных наблюдений взяты данные гидрометеорологического мониторинга, проводимого на стационарной океанографической платформе (СОП) Черноморского гидрофизического полигона РАН в 2012 – 2015 гг. Рассматриваются 6 случаев наиболее интенсивного ветрового волнения, измеренного в районе СОП, с высотами значительных волн, превышающими 2 м. Приводятся коэффициенты корреляции между модельными расчётами и натурными измерениями, величины СКО для выбранных штормовых ситуаций. Выявлено удовлетворительное соответствие высот значительных волн, рассчитанных по модели *SWAN*, с данными натуральных наблюдений на СОП.

Ключевые слова: *SWAN, MERRA, высоты волн, скорость ветра, СКО, коэффициент корреляции, Черное море, Южный берег Крыма, СОП, натурные измерения*

Прибрежные регионы являются зоной активного взаимодействия различных гидродинамических процессов, которые в значительной степени влияют на хозяйственную деятельность. В первую очередь это относится к штормовому волнению, которое оказывает разрушительное воздействие на побережье и прибрежную инфраструктуру, нередко приводя к значительному материальному ущербу. В этой связи разработка и использование прогностических моделей ветрового волнения для прибрежных акваторий представляет собой важную научно-прикладную задачу.

Целью работы является верификация спектральной волновой модели *SWAN* по данным натуральных наблюдений за ветро-волновыми характеристиками на стационарной океанографической платформе (СОП) Черноморского гидрофизического полигона РАН в пгт.Кацивели за штормовые периоды 2012 – 2015 гг. Для сравнительного анализа использовались измерения на СОП высот волн и скоростей ветра за 6 случаев с наиболее сильным ветровым волнением с высотами значительных волн, превышающих 2 м.

Технология моделирования ветрового волнения в районе СОП. Спектральная модель *SWAN* [1] базируется на численном решении уравнения баланса волновой энергии:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta N) = \frac{S}{\sigma}. \quad (1)$$

Здесь $N = E/\sigma$ – плотность волнового действия; E – энергетический спектр волнения; x, y, t – пространственные координаты и время; σ, θ – частотная и угловая координаты. Величины $c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta$ представляют собой скорости

переноса плотности волнового действия вдоль пространственных и частотно-угловых координат. В правой части уравнения в числителе дроби находится функция источника волновой энергии:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{wc} + S_{bf} + S_{div}, \quad (2)$$

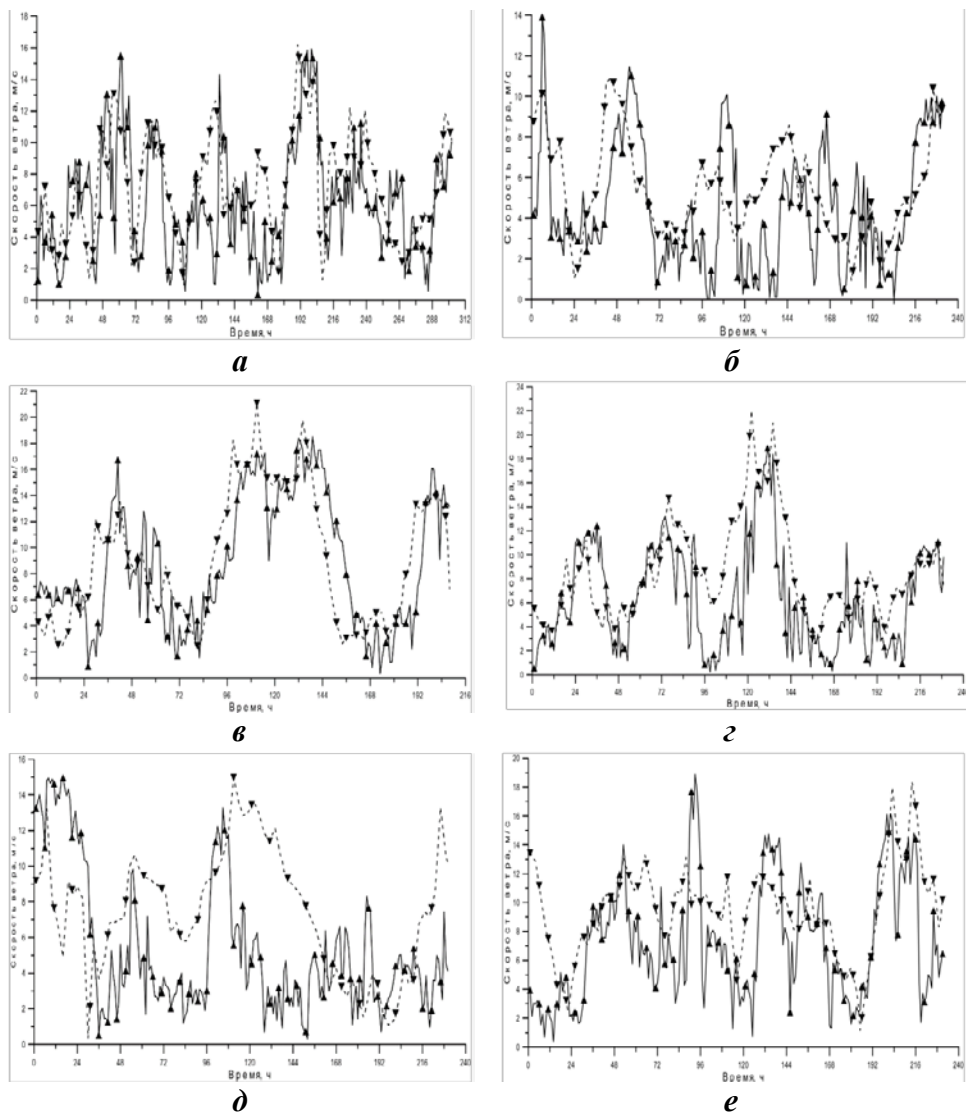
где S_{in} – источник генерации волн ветром; S_{nl} – источник нелинейных взаимодействий спектральных гармоник; S_{wc} – источник диссипации волновой энергии за счет обрушения волновых гребней; S_{bf} – источник диссипации волновой энергии за счет донного трения; S_{div} – источник диссипации волновой энергии за счет обрушения волн на критической глубине.

Моделирование ветрового волнения в районе СОП проводилось на основе 4-х шагового метода вложенных сеток. На первом шаге проводилось моделирование волновых полей во всем Азово-Черноморском бассейне на сетке с разрешением в 4,5 км. На втором шаге на сетке с разрешением 800×1130 м волнение рассчитывалось для акватории, включающей южный берег Крыма. На третьем шаге волнение моделировалось в прибрежной зоне Южного берега Крыма от пгт.Понизовка до пгт.Симеиз с пространственным разрешением в 200 м. На последнем шаге с разрешением 15×20 м рассчитывались поля волн для Голубого залива с детализацией в точке расположения океанографической платформы. Условия на жидких границах определялись путем интерполяции модельных данных с предыдущих этапов. Расчеты выполнялись на вычислительном кластере Морского гидрофизического института с использованием технологии параллельных вычислений.

Анализ данных по скорости ветра. Как показано в [2, 3], качество ветровых полей играет важную роль в прогнозировании ветрового волнения в Черноморском регионе. В настоящей работе в качестве форсинга использовались поля приземного ветра из ре-анализа *MERRA* [4]. Рассматривались 10-ти и 15-ти дневные интервалы времени, для которых высоты значительных волн достигали или превышали значение в 2 м. Всего было выбрано 6 штормовых периодов с сильным ветровым волнением (рис.1): 1 – 16 декабря 2012 г.; 5 – 15 марта 2013 г.; 21 – 30 января 2014 г.; 5 – 15 марта 2014 г.; 20 – 30 ноября 2014 г.; 1 – 11 января 2015 г.

Для скоростей модельного и натурального ветра были рассчитаны среднеквадратичные отклонения и коэффициенты корреляции (табл.1). Общий сравнительный анализ показал, что в целом натурные и модельные данные по скоростям ветра удовлетворительно согласуются между собой. Наилучшее соответствие показывают ряды данных за следующие три периода: с 1 по 16 декабря 2012 г., с 21 по 30 января 2014 г. и с 5 по 15 марта 2014 г. Для этих периодов получены минимальные значения среднеквадратичных отклонений скорости ветра, а также максимальные значения.

В целом по всем шести сравниваемым временным интервалам среднее значение коэффициента корреляции составляет 0,52. Кроме того, для вариантов мартовского ветра за 2013 г. и январского за 2014 г. наблюдается смещение сравниваемых рядов данных друг относительно друга на 6 – 8 часов. Наименьшая корреляция ($r = 221$) и наибольшие величины СКО ($\sigma = 5$ м) соответствует случаю с ноябрьским штормом 2014 г. Такого рода несоответствие между скоростями модельного и натурального ветров связано с



Р и с. 1. Скорость ветра *MERRA* (м/с) и скорость измеренного ветра (м/с) на СОП за штормовые периоды: 1 – 16 декабря 2012 г. (*a*); 5 – 15 марта 2013 г. (*б*); 21 – 30 января 2014 г. (*в*); 5 – 15 марта 2014 г. (*г*); 20 – 30 ноября 2014 г. (*д*); 1 – 11 января 2015 г. (*е*). Сплошные кривые – измеренная скорость ветра на платформе. Пунктирные линии – скорость ветра на СОП по данным ре-анализа *MERRA*.

Т а б л и ц а 1. Коэффициенты корреляции и СКО сравниваемых вариантов скоростей ветра для 6 штормовых периодов.

дата	декабрь 2012 г.	март 2013 г.	январь 2014 г.	март 2014г.	ноябрь 2014 г.	январь 2015 г.
СКО, σ , м	3,41	2,99	3,56	4,15	5,00	4,25
корреляция, r	0,53	0,45	0,74	0,64	0,22	0,52

региональными особенностями прибрежного поля ветра вследствие влияния рельефа суши [5].

Верификация модели SWAN по данным натурным наблюдений. Верификация волновой модели проводилась путем сравнения рассчитанных волновых параметров с натурными данными за 6 вышеуказанных штормовых периодов. В качестве сравнительной характеристики были выбраны высоты значительных волн (H_s). Во всех численных экспериментах параметры волновой модели выбирались равными значениям, задаваемым “по умолчанию”. Шаг по временной координате (Δt) брался равным 20 минутам, по угловой координате ($\Delta \theta$) – 10° . По частотной координате использовалась сетка с 30 узлами, охватывающая частотный интервал 0,04 – 2,0 Гц. Донное трение задавалось параметризацией Гранта-Мадсена [6]. Обрушение волн на критической глубине задавалось через коэффициент отношения высоты волны к глубине, равный 0,8. Моделирование проводилось с использованием соответствующих вышеуказанным временным интервалам полей ветра модели *MERRA*. Результаты расчетов выводились в точке расположения океанографической платформы.

Модельные и натурные ряды высот значительных волн (м) в точке расположения СОП за штормовые периоды представлены на рис.2.

Таблица 2 содержит значения среднеквадратичных отклонений и коэффициентов корреляции высот значительных волн сравниваемых рядов данных.

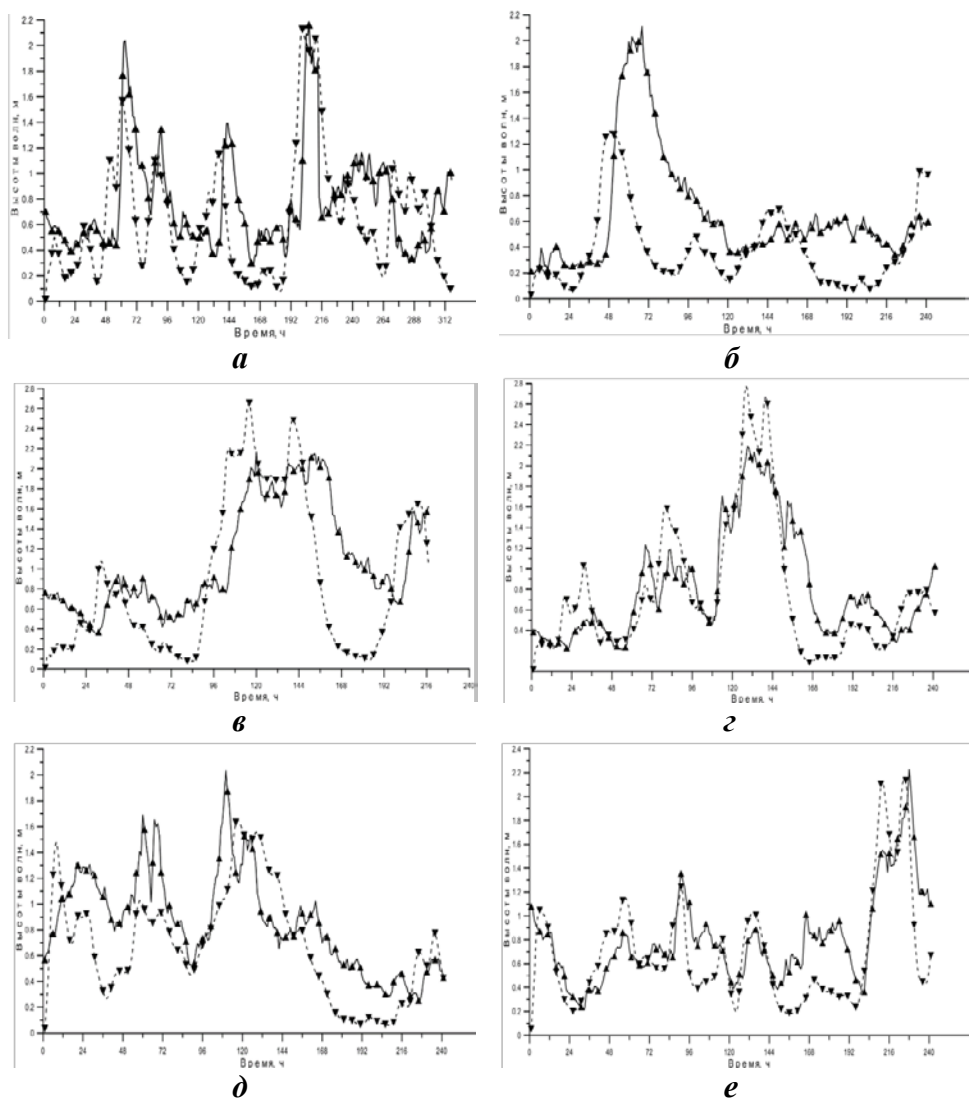
Как показал анализ, в большинстве случаев наблюдается хорошая согласованность модельных и натуральных данных как по амплитуде, так и по фазе. Наилучшее соответствие имеет место для мартовского шторма 2014 г. и январской штормовой ситуации 2015 г. Этим двум ситуациям соответствуют минимальные значения СКО (0,37 м и 0,33 м) и максимальные значения коэффициента корреляции (0,82 и 0,73).

Кроме этих двух ситуаций, достаточно хорошую корреляционную зависимость показали случаи январского и ноябрьского штормов 2014 г. Для них средние величины коэффициентов корреляции равны 0,68 и 0,67 соответственно. Для ноябрьской ситуации, кроме того, характерно промежуточное значение СКО (0,38 м).

Наименьшие коэффициенты корреляции получены для декабря 2012 г. и марта 2013 г. (табл.2). Наиболее слабое соответствие имеет место для второго случая. Для него модельные и натурные высоты волн характеризуются минимальным коэффициентом корреляции ($r = 0,34$) и одним из наибольших значений СКО ($\sigma = 0,52$ м).

Основной причиной таких различий как в скорости ветра, так и, следовательно, в высотах волн является недостаточное пространственное разрешение ре-анализа *MERRA*. В подсеточный масштаб ре-анализа *MERRA* попадают региональные особенности Южного берега Крыма: сложная топография и специфическая система ветров, связанная с наличием горного рельефа.

Выводы. В работе путем сравнения модельных и натуральных данных в районе океанографической платформы проведена верификация волновой модели *SWAN*. Анализировались 6 промежутков времени, соответствующих случаям с сильным штормовым волнением: 1 – 16 декабря 2012 г., 5 – 15 марта 2013 г., 21 – 30 января 2014 г., 5 – 15 марта 2014 г., 20 – 30 ноября 2014 г.



Р и с . 2 . Модельные и натурные ряды высот значительных волн (м) в точке расположения СОП за штормовые периоды: 1 – 16 декабря 2012 г. (а); 5 – 15 марта 2013 г. (б); 21 – 30 января 2014 г. (в); 5 – 15 марта 2014 г. (г); 20 – 30 ноября 2014 г. (д); 1 – 11 января 2015 г. (е). Сплошные кривые – измерения высот значительных волн на платформе. Пунктирные линии – высоты значительных волн по данным модели SWAN.

Т а б л и ц а 2 . Коэффициенты корреляции и СКО высот волн модельных и натуральных рядов для 6 штормовых периодов.

дата	декабрь 2012 г.	март 2013 г.	январь 2014 г.	март 2014г.	ноябрь 2014 г.	январь 2015 г.
СКО, σ , м	0,46	0,52	0,61	0,37	0,38	0,33
корреляция, r	0,49	0,34	0,67	0,82	0,68	0,73

и с 1 по 11 января 2015 г. В качестве форсинга использовались поля ветра из ре-анализа *MERRA* за вышеуказанные промежутки времени.

Показано, что в целом наблюдается удовлетворительное соответствие высот значительных волн, рассчитанных по модели *SWAN*, с данными натурных наблюдений на океанографической платформе. Выявленные несоответствия между реальными и модельными данными, как по высотам волн, так и по скоростям ветра, вызваны в основном влиянием на прибрежные поля ветра региональных особенностей горного рельефа береговой части Крымского полуострова. Учитывая все вышеизложенное, можно сделать вывод о пригодности волновой модели *SWAN* для расчетов ветрового волнения в прибрежной зоне Крымского полуострова при условии наличия для исследуемого района метеорологического прогноза с высоким пространственным разрешением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *SWAN user manual. SWAN Cycle III version 40.91. Technical documentation.*– Delft University of Technology, 2014.– 123 p.
2. *Van Vledder G.Ph., Akpinar A. Wave model predictions in the Black Sea: Sensitivity to wind fields // Applied Ocean Research.*– 2015.– v.53.– P.161-178.
3. *Akpinara A., Ponce de León S. An assessment of the wind re-analyses in the modelling of an extreme sea state in the Black Sea // Dynamics of Atmospheres and Oceans.*– 2016.– v.73.– P.61-75. doi:10.1016/j.dynatmoce.2015.12.002
4. *Rienecker M.M. et al. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications // J.Climate.*– 2011.– v.24, № 14.– С.3624-3648.
5. *Мысленков С.А., Архипкин В.С. Анализ ветрового волнения в Цемесской бухте Черного моря с использованием модели SWAN // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра РФ.*– 2013.– вып.350.– С.58-67.
6. *Madsen O.S., Poon Y.-K., Graber H.C. Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory// Proc. 21st International Conference of Coastal Engineering.*– Torremolinos: ASCE, 1988.– 1.– P.492-504.

Материал поступил в редакцию 09.06.2016 г.

S.Yu.Mikhailichenko, A.V.Garmashov, V.V.Fomin

VERIFICATION OF THE SWAN WIND WAVES MODEL BY OBSERVATIONS ON THE STATIONARY OCEANOGRAPHIC PLATFORM OF THE BLACK SEA HYDROPHYSICAL POLYGON OF RAS»

The spectral wave *SWAN* model for the Blue Lagoon (Katsiveli, Crimea) of the Black Sea is verified. The data of hydrometeorological monitoring, conducted on the stationary oceanographic platform of the Black Sea Hydrophysical Polygon of RAS» in 2012 – 2015, was taken as in situ observation. The six cases of the most intensive wind waves (with heights of significant waves exceeding 2 m) measured near the platform are considered. The correlation coefficients between the model calculations and the measurements and the standard deviation for the selected storm situations are given. In conclusion, the satisfactory compliance of the *SWAN* model calculations of the significant wave heights with the data of observations on the SOP was revealed.

KEYWORDS: *SWAN*, *MERRA*, wave heights, wind speed, standard deviation, correlation coefficient, the Black Sea, Southern Coast of Crimea, stationary oceanographic platform, measurements