

Член-корреспондент НАН Украины **А. Б. Полонский, В. В. Фомин, А. В. Гармашов**

Характеристики ветрового волнения Черного моря

*Проведено розрахунок і аналіз характеристик вітрового хвилювання Чорного моря з просторовим розподілом 4,5 км за період 1979–2008 рр. Для розрахунку використовували числову модель *Simulating WAves Nearshore (SWAN)* і дані ре-аналізу приземного вітру Японського метеорологічного агентства з дискретністю 6 год. Для коригування даних ре-аналізу застосовували розрахунки швидкості та напрямку вітру на морський стаціонарній платформі (МСП) у північно-західній частині Чорного моря. Верифікацію моделі *SWAN* проводили за результатами вимірів хвилювих характеристик на МСП. Максимальні висоти хвиль (понад 12 м) відзначаються в південно-західній частині Чорного моря при вітрах східних і північно-східних румбів.*

Возрастающая интенсивность хозяйственной деятельности в Азово-Черноморском бассейне, связанная с развитием прибрежной инфраструктуры и освоением нефтяных и газовых месторождений, обуславливает повышение качества регионального гидрометеорологического обеспечения. Одной из основных задач такого обеспечения является оценка режимных (климатических) характеристик ветрового волнения. Для практических приложений особенно важны характеристики экстремально высоких волн. Для прибрежных районов Черного моря режимные расчеты (включая повторяемость значительных волн) выполнены по результатам длительных инструментальных наблюдений за ветром на гидрометеорологических станциях (см., например, [1]); для открытых частей моря соответствующие расчеты по данным наблюдений отсутствуют. Поэтому используются результаты расчетов ветрового волнения, выполненные с применением спектральных моделей (*WAve prediction Model (WAM)* и *Simulating WAves Nearshore (SWAN)*). При этом реалистичность параметров полученного ветрового волнения в значительной мере определяется качеством входных полей ветра. Как правило, для оценки режимных характеристик и экстремального волнения используются поля ветра атмосферного ре-анализа. Так, в [2] по данным ре-анализа Национального центра прогнозов США (NCEP) приведены характеристики ветроволнового режима Черного моря с применением модели *WAM* [3]. Для проверки результатов расчетов необходимо привлекать натурные данные. Наличие регулярных ветроволновых наблюдений, проведенных в открытой части на северо-западном шельфе Черного моря [4, 5], позволяет провести валидацию модельных расчетов и уточнить режимные характеристики ветровых волн в Черном море.

Климатические характеристики ветрового волнения Черного моря с использованием данных ре-анализа Японского метеорологического агентства (JRA) [6] и модели волнения *SWAN* [7] представлены в настоящем сообщении. Применяя глобальную спектральную атмосферную модель с трехмерной вариационной ассимиляцией всех доступных результатов измерений, получены данные ре-анализа JRA. Пространственное разрешение расчетных полей $1,25^\circ \times 1,25^\circ$. Дискретность доступных результатов ре-анализа по времени — 6 ч. В настоящее время существует массив данных с 1979 по 2008 гг. включительно, что дает возможность получить климатический режим, в том числе и для ветроволновых характеристик.

Модель SWAN учитывает все механизмы волнообразования на глубокой воде и при этом более адекватно (по сравнению с моделью WAM) описывает физику ветрового волнения в мелководных районах. Модель основана на численном решении уравнения баланса волновой энергии в спектральной форме:

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

Здесь $N = E/\omega$ — плотность волнового действия; E — энергетический спектр волнения; x , y и t — пространственные координаты и время; ω и θ — частотная и угловая координаты. Величины c_x , c_y , c_ω , c_θ — скорости переноса плотности волнового действия вдоль соответствующих пространственных и частотно-угловых координат [7]. Функцию источника в правой части уравнения (1) можно записать так:

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

где S_{in} — источник генерации волн ветром; S_{nl} — нелинейные взаимодействия спектральных гармоник; S_{wc} — диссипация энергии вследствие обрушения волновых гребней; S_{bf} — диссипация энергии, обусловленная донным трением; S_{dib} — обрушение волн на критических глубинах.

Расчеты выполнены на вычислительном кластере Морского гидрофизического института НАН Украины. Применялась параллельная версия модели SWAN [8]. Волновые характеристики рассчитывались на сетке 246×160 , покрывающей Азово-Черноморский бассейн с шагом $\sim 4,5$ км. Рельеф дна задавался на той же сетке. Частотный интервал ($\omega_{\min} \leq \omega \leq \omega_{\max}$, где $\omega_{\min} = 0,05$ Гц, $\omega_{\max} = 1$ Гц) покрывался неравномерной сеткой с 25 узлами. Разрешение модели по угловой координате — 20° . Шаг интегрирования по времени уравнения (1) — 10 мин. Донное трение определялось, согласно теории Гранта–Мадсена [9].

На входе в модель задавались зональная и меридиональная компоненты вектора ветра из массива ре-анализа JRA на стандартной высоте 10 м с дискретностью 6 ч. Выходные характеристики модели: H_s — высота значительных волн (среднее значение высот 1/3 наиболее высоких волн в спектре волнения); θ_m — среднее направление распространения волн; T_m — средний период волн; T_p — пиковый период волн; θ_p — направление волн, соответствующее пиковому периоду.

Для настройки модели SWAN было проведено сопоставление результатов моделирования ветрового волнения с измерениями на морской стационарной платформе, расположенной на северо-западном шельфе Черного моря на глубине ~ 30 м в точке с координатами $45^\circ 42,5'$ с. ш., $31^\circ 52,5'$ в. д. (рис. 1). Здесь, начиная с 1996 г., функционирует автоматизированный гидрометеорологический комплекс, измеряющий не только атмосферные характеристики, но и волнение (см. *врезку* на рис. 1). Диапазоны измерения гидрометеорологических параметров и погрешности датчиков приведены в статье [5]; качество измеряемых данных и методика устранения сбоев — в [4]. Измеренная скорость ветра приводилась к скорости ветра на стандартной высоте (U_{10}) с помощью логарифмической зависимости ветра с высотой. Параметр шероховатости принимался равным $5 \cdot 10^{-4}$ м.

Для настройки поля ветра, генерирующего ветровое волнение в модели, было отобрано восемь реализаций измерений скорости ветра на платформе с минимальным количеством сбоев. Установлено, что коэффициент корреляции для всех реализаций находился в пределах 0,8–0,9, а скорость ветра, согласно данным ре-анализа, занижена по сравнению с дан-

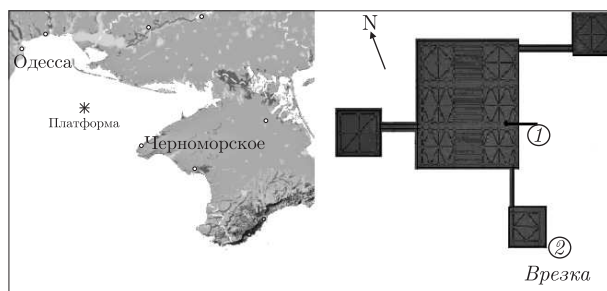


Рис. 1. Расположение и схема (врезка) морской стационарной платформы в Черном море (цифры в кружках: 1 — положение гидрометеорологического комплекса; 2 — положение волнографа)

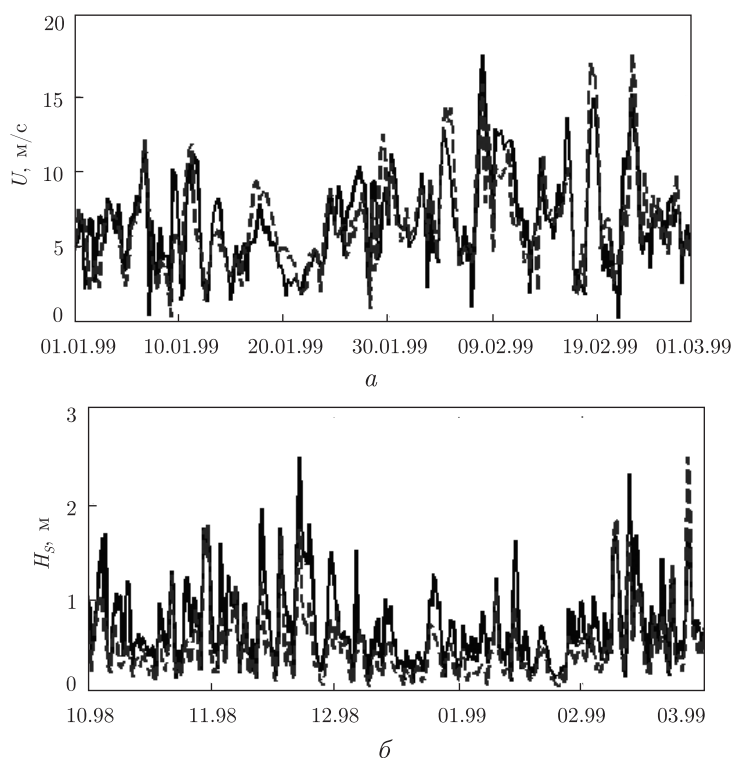


Рис. 2. Характеристики ветрового режима в районе измерений в 1999 г.: *a* — вариации модуля скорости ветра на платформе (сплошная кривая) и по данным ре-анализа (штриховая кривая) за период с января по февраль-март 1999 г. (скорость ветра по данным ре-анализа умножена на поправочный коэффициент 1,3); *б* — расчетные (штриховая кривая) и измеренные (сплошная кривая) вариации высот значительных волн в районе платформы за период с октября 1998 г. по март 1999 г.

ными наблюдений на 25–30%. Причина такого занижения — недостаточно хорошее пространственное разрешение в ре-анализе JRA, поэтому скорость ветра при расчетах ветрового волнения умножалась на поправочный коэффициент 1,3. Изменчивость скорости ветра по данным ре-анализа хорошо согласуется по фазе с реальной изменчивостью ветра (рис. 2, *a*).

Для верификации модели SWAN был выбран 5-месячный интервал (с 01.10.1998 г. по 28.02.1999 г.), охватывающий осенне-зимний штормовой период и имеющий минимальное количество сбоев. Высоты значительных волн по результатам измерений оценивались фор-

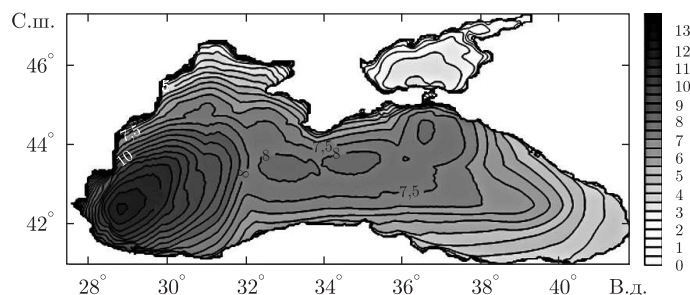


Рис. 3. Поле максимальных значений высоты значительных волн с 1979 по 2008 гг.

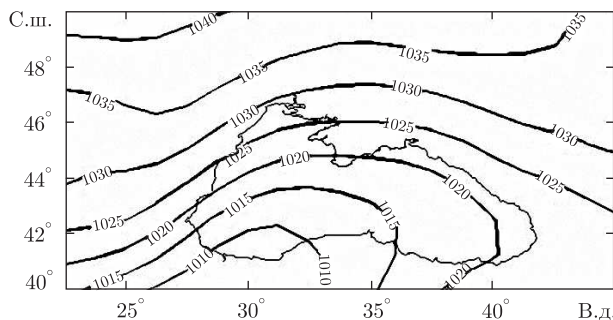


Рис. 4. Поле приводного давления (в гПа) для Черноморского региона 9 января 1981 г.

мулой: $H_s^M = 4\sqrt{m_0}$, где m_0 — дисперсия, вычисленная по 17-минутной реализации измерений колебаний взволнованной поверхности. Как видно на рис. 2, б, модель достаточно адекватно воспроизводит фазы усиления и ослабления ветрового волнения в районе платформы. Коэффициент корреляции между рассчитанными и измеренными высотами волн превышает 0,8. Среднеквадратическая ошибка зафиксирована на уровне 0,25 м. Модель несущественно занижает высоты волн ($< 0,1$ м).

Если принять во внимание, что платформа удалена от наземных метеорологических станций, по которым усваивалась информация, а положение платформы не является оптимальным по отношению к узлам сетки ре-анализа JRA, то полученный результат сопоставления следует признать вполне удовлетворительным.

Расчет характеристик волновых полей Черного моря для периода 1979–2008 гг. показал, что максимальные высоты волн (> 12 м) отмечались в юго-западной части Черного моря (рис. 3). Анализ поля приводного давления свидетельствует о том, что во всех случаях, когда высота волн в этом районе моря превышала 8 м, преобладал устойчивый ветер восточных или северо-восточных румбов. В качестве примера на рис. 4 приведено такое поле для 9 января 1981 г., когда высота волн в юго-западной части моря превышала 12 м. Статистические расчеты показали, что обеспеченность 10-метровых волн в этом районе составляет $7 \cdot 10^{-3}\%$ (т. е. приблизительно 1 раз в 10 лет). Период таких волн — около 14 с, а длина — около 100 м.

Таким образом, в Черном море возможны экстремально высокие волны высотой более 12 м, даже если не рассматривать особенно интенсивные волны (так называемые волны-убийцы), которые плохо описываются спектральными моделями [10].

Работа выполнена в рамках национального академического проекта “ГРИД-МГИ” при поддержке гранта 7-й рамочной программы THESEUS.

1. Воскресенская Е. Н., Наумова В. А., Евстигнеев М. П., Евстигнеев В. П. Классификация синоптических процессов в Азово-Черноморском бассейне // Эколог. безопасность прибрежн. и шельф. зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2009. – Вып. 19. – С. 386–394 – [Сб.].
2. Ефимов В. В., Комаровская О. И. Атлас экстремального ветрового волнения Черного моря. – Севастополь: НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2009. – 59 с.
3. WAMDI group. The WAM model – a third generation ocean wave prediction model // J. Phys. Oceanogr. – 1988. – **18**. – P. 1775–1810.
4. Полонский А. Б., Гармашов А. В., Коровушкин А. И., Толожнов Ю. Н. Изменчивость характеристик ветра в северо-западной части Черного моря с 1996 по 2001 гг. // Системы контроля окруж. среды. – 2008. – С. 320–325. – [Сб.].
5. Толожнов Ю. Н., Коровушкин А. И., Козлов К. Г. Автоматизированный гидрометеорологический комплекс // Там же. – 1998. – С. 12–17. – [Сб.].
6. Onogi K., Tsutsui J, Koide H. et al. The JRA – 25 Reanalysis // J. Meteor. Soc. Jap. – 2007. – **85**. – P. 369–432.
7. Booij N., Ris R. C., Holthuijsen L. H. A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation // J. Geophys. Res. – 1999. – **104**(C4). – P. 7649–7666.
8. SWAN Cycle III version 40.72, User Manual. – Delft: Delft Univ. Technol., Netherlands, 2008. – 117 p.
9. Grant W. D., Madsen O. S. Combined wave and current interaction with a rough bottom // J. Geophys. Res. – 1979. – **84**(C4). – P. 1797–1808.
10. Доценко С. Ф., Иванов В. А. Волны-убийцы // Сб. Мор. гидрофиз. ин-та НАН Украины. Сер. Соврем. пробл. океанологии. Вып. 1. – Севастополь, 2006. – 44 с.

Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь

Поступило в редакцию 20.12.2010

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. B. Polonsky, V. V. Fomin,
A. V. Garmashov**

Characteristics of wind waves of the Black Sea

The calculation and analysis of characteristics of wind waves of the Black Sea are carried out with a spatial resolution of 4.5 km for a period of 1979–2008. The numeral model Simulating WAVes Nearshore (SWAN) and the data of reanalysis of the surface wind of the Japanese meteorological agency (JRA) with a resolution of 6 h are used in calculations. Data of reanalysis were corrected by measuring the speed and the direction of winds on a marine stationary platform (MSP) in the north-west part of the Black Sea. Verification of the model SWAN is carried out by the data of measuring the wave characteristics on MSP. It is got that the maxheights of waves (more than 12 m) are registered in the south-west part of the Black Sea at winds of the east and north-east directions.