

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В СЕВЕРОЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Побережный Ю. А.
Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

В настоящей работе рассматривается численная модель ветрового волнения, учитывающая на современном уровне механизмы генерации волн ветром и нелинейное взаимодействие в спектре, а также динамику волн на мелководье. Модель базируется на спектральном уравнении баланса волновой энергии с заданными функциями источником и стоков и является адаптацией численной волновой модели SWAN (Simulation WAve Nearshore), разработанной для получения реалистических оценок волновых параметров в прибрежных зонах, озерах и эстуариях при заданном поле ветра, рельфе дна и приповерхностных течениях.

SWAN представляет третье поколение численных волновых моделей, являющихся развитием моделей первого и второго поколений.

Рассматривается уравнение баланса волновой энергии в спектральной форме, левая часть которого описывает горизонтальную адвекцию, а правая - источники энергии и эффекты диссипации энергии. Она описывает также процессы распространения волн на мелководье с учетом рефракции волн при изменениях глубины, и горизонтально неоднородных течений. Также учитывается:

генерация волн ветром;

диссипация энергии за счет обрушения пенных барашками;

диссипация энергии за счет обрушения волн на мелководье;

диссипация энергии волн на дне;

трансформация волновой энергии по спектру за счет трехволнового и четырехволнового взаимодействия.

Расчеты производятся в двух режимах: нестационарном и стационарном. Стационарный режим используется для расчета волн с относительно коротким временем пребывания в расчетной области, то есть для случаев, когда время прохождения волн через заданный регион мало по сравнению с временными масштабами изменчивости волновых параметров (граничные условия, ветер, приливы, штормовые волны). В квазистационарном приближении модель применяется для вычислений в режиме последовательной смены заданных

стационарных условий на некоторых временных отрезках.

Эффекты дифракции в модели не учитываются, поэтому модель не может быть применена к области, в которой высота волн изменяется на горизонтальных масштабах порядка длины волны. Поэтому рассчитанное волновое поле в основном не будет оценивать трансформацию волн непосредственно за препятствием.

Профиль дна и горизонтальные течения являются входными параметрами. Они не рассчитываются в модели, так что возбуждаемые волнами нагоны, или волновые течения рассчитываются в нашей схеме последовательно вслед за расчетом поля волн как некоторые аддитивные составляющие. Их взаимодействие на рассчитанное поле волн не учитывается.

Кратко рассмотрим определяющие уравнения и их численную реализацию [1]. Волны в модели SWAN описываются двухмерным частотно-угловым спектром энергии $E(\sigma, \theta)$. Независимыми переменными являются относительная частота σ и направление распространения волн θ .

Развитие спектра волнения описывается уравнением баланса спектрального действия, которое в декартовых координатах имеет вид (Whitham, 1974), [2]:

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

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial m} \right] \quad (5)$$

где $\bar{k} = (k_x, k_y)$ - волновое число, d - глубина воды, $\bar{U} = (U_x, U_y)$ скорость течения, s - пространственная координата в направлении θ и m - координата, нормальная к s . Оператор d/dt обозначает полную производную и определяется как:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \bar{c} \cdot \Delta_{x,y} \quad (6)$$

Член S в правой части уравнения баланса действия представляет функцию источника, определяющую эффекты генерации волн ветром, диссипации и нелинейного взаимодействия в спектре $S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl}$. Это уравнение баланса спектрального действия есть базисное уравнение SWAN модели.

Исходное уравнение переноса интегрируется по конечно-разностной схеме во всех пяти измерениях (время, географическое пространство, направление и спектр) с постоянным временным инкрементом. По пространству задается прямоугольная сетка с постоянным шагом Δx и Δy . Спектр задается с постоянным разрешением по направлению $\Delta\theta$ и постоянным разрешением относительной частоты $\Delta f/f$. Для экономии предусмотрена возможность вычисления волновых компонент, проходящих только в определенном секторе с направлениями $\theta_{min} < \theta < \theta_{max}$ (например, только те компоненты, которые движутся к берегу).

Численная схема в SWAN модели была выбрана исходя из требований устойчивости, точности и экономии. Для уравнения переноса наиболее подходящей будет неявная численная схема. Такая схема также экономична в том смысле, что она безусловно стабильна. Однако такие схемы не позволяют использовать относительно большие временные инкременты в вычислениях для мелкой воды по сравнению с явными схемами. Практика расчетов показала, что для прибрежных приложений эта разностная схема первого порядка обычно достаточно точна. Однако, тестовые расчеты также показали, что в спектральном пространстве требуется большая точность, чем в схеме вперед по потоку первого порядка. Это достигается дополнением этой схемы более экономичной центральной схемой. В SWAN однако, применяется полностью неявная схема вперед по потоку по пространству и спектру, дополненная центральной разностной схемой в спектральном пространстве.

В результате дискретизации, основное уравнение переноса принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{N^n - N^{n-1}}{\Delta t} \right]_{i_x, i_y, i_\theta, i_\sigma} + \\ & \left[\frac{[c_x N]_i - [c_x N]_{i-1}}{\Delta x} \right]_{i_x, i_\sigma, i_\theta} + \left[\frac{[c_y N]_i - [c_y N]_{i-1}}{\Delta y} \right]_{i_y, i_\sigma, i_\theta} + \\ & + \left[\frac{(1+\nu)[c_\sigma N]_{i+1} - 2[c_\sigma N]_i - (1-\nu)[c_\sigma N]_{i-1}}{2\Delta\sigma} \right]_{i_\sigma, i_\theta} + \\ & \left[\frac{(1+\eta)[c_\theta N]_{i+1} - 2\eta[c_\theta N]_i}{2\Delta\theta} \right]_{i_\theta} = \\ & = \left[\frac{S}{\sigma} \right]_i \end{aligned} \quad (7)$$

где $i_x, i_y, i_\theta, i_\sigma$ и i_θ - счетчики по сетке и $\Delta x, \Delta y, \Delta t, \Delta\sigma$ и $\Delta\theta$ - инкременты по времени, географическому и спектральному пространству соответственно. Производные по глубине и производные по течению в выражениях c_σ и c_θ рассчитаны по схеме вверх по потоку первого порядка. Коэффициенты ν и η контролируют численную диффузию в частотной области и в пространстве направлений соответственно. Значение $\nu = 0$ или $\eta = 0$ соответствует центральной схеме, которая имеет наибольшую точность. Значение $\nu = 1$ или $\eta = 1$ соответствует схеме вверх по потоку, которая менее точна, но более устойчива. Для больших градиентов плотности волнового действия в частотной области или в пространстве направлений, численные колебания могут возрасти, особенно в схеме с центральными разностями, приводя к отрицательным значениям в плотности действия. В каждом проходе, такие отрицательные значения полагаются равным нулю в двухмерном спектре и оставшиеся положительные значения пересасшаблируются так, чтобы плотность действия на спектральное направление сохранялась.

В тестовых задачах качественно изучаются достоинства и недостатки конкретных моделей на основе экспертных оценок. Очевидно, что система тестов должна удовлетворять ряду требований [3].

Тестовые задачи должны быть информативными. Мерой их информативности служит

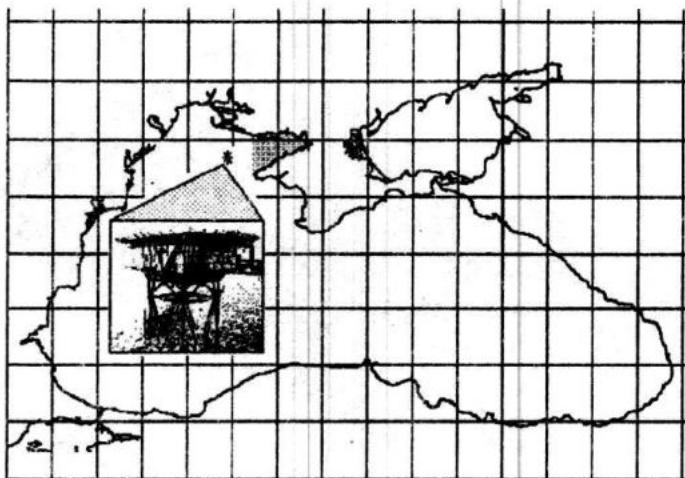


Рис. 1. Расположение полигона моделирования. Каркинитский залив, северо-западная часть Черного моря.

величина разброса расчетных значений контрольных параметров, характеризующих эволюцию поля ветрового волнения. Чем больше разброс значений этих параметров, в разных моделях, тем более информативен тест. Выбор контрольных параметров — неотъемлемая часть составления тестовой задачи.

Предсказуемость основных черт конечного результата. Это свойство теста должно вытекать либо из фундаментальных законов физики (например, законов сохранения), либо из обобщенных результатов экспериментальных наблюдений. С целью обеспечения данного качества в формулировке тестовых задач целесообразно использовать сравнительно простые или даже идеализированные условия волнообразования. Фактор предсказуемости гарантирует возможность качественной оценки степени совершенства модели.

Узкая целевая направленность теста. Это позволяет дифференцировать модели по количественным характеристикам описания основных особенностей эволюции, таких как развитие волн, их поведение при развороте ветра, затухание, взаимодействие систем волн и т. п.

Вообще говоря, при численном моделировании ветровых волн, классическими тестами считаются расчет поворота ветра, расчет рефракции на мелкой воде, расчет затухания при уменьшении дна. В модели SWAN эффект поворота ветра не играет существенной роли, так как эта модель предназначена для расчетов на масштабах гораздо меньших, чем масштабы генерации волн ветром. Поэтому представляет интерес тестовый случай для расчета рефракции волнения при уменьшении глубины. Модель

SWAN была адаптирована для тестовых расчетов поля ветрового волнения в Каркинитском заливе, расположенному в северо-западной части Черного моря (рис. 1). Данный регион является важным для моделирования, так как в этой части моря происходит добыча природного газа и необходимо детальное знание волновой ситуации для грамотного проектирования прочности буровых оснований. Кроме того, на платформе Голицина-4 располагается метеорологическое оборудование, измеряющее волновые и метеорологические параметры в точке $31^{\circ}52.5'$, $45^{\circ}42.5'$, что позволяет производить оценку правильности счета и корректировать модель, улучшая точность совпадения модели с экспериментальными данными.

Расчет выполнен для нескольких углов прихода волн в залив из открытого моря. Практически, более интересен случай прихода волн с южного и юго-западного направлений, так как с западного направления разгон волн вне залива невелик, и вряд ли можно ожидать отсюда прихода сколько-нибудь существенной волновой энергии.

Глубина дна по всей акватории Каркинитского залива не превышает 25 метров (рис. 2), поэтому при расчете было необходимо учитывать динамику ветровых волн на мелководье.

Расчетная сеть представлена на рис. 3.

На рис. 4 приведены результаты расчета ветрового волнения в Каркинитском заливе для двух случаев волнения в открытой части моря. Это случай шторма на западной границе расчетного региона, при котором на открытой границе задана фиксированная высота волны и угол прихода волн в расчетную область. Для обоих случаев высота волнения была принята

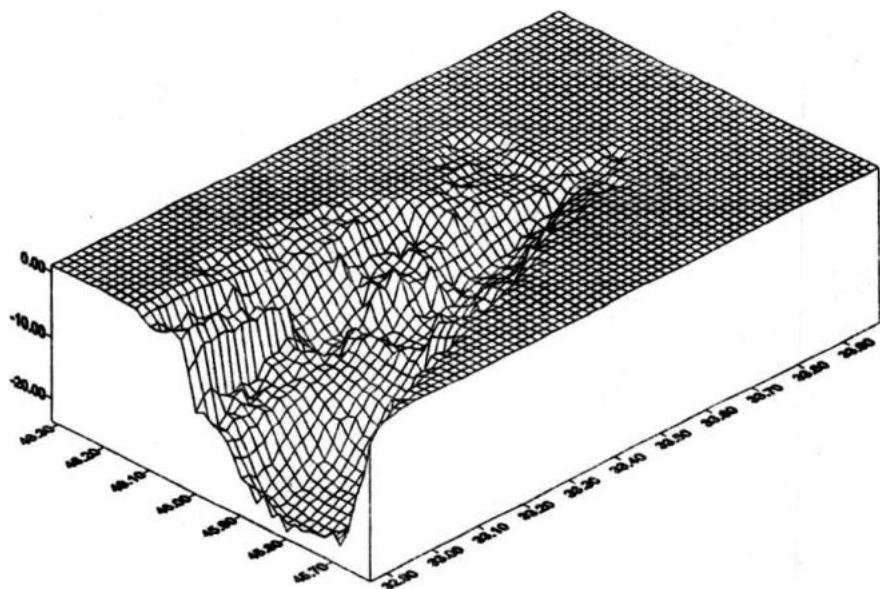


Рис. 2. Профиль дна Каркинитского залива. Глубина в метрах, пространственные координаты в градусах.

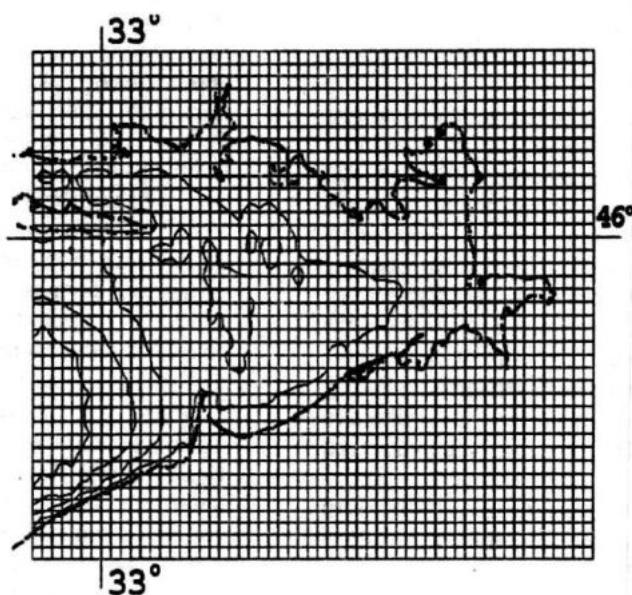


Рис. 3. Узлы координатной сетки модели для Каркинитского залива. Шаг сетки соответствует одной минуте.

равной 4 метрам. В случае а) угол распространения волн был принят 0° (отсчитывается от горизонтальной оси, направленной на восток), а в случае б) угол составлял 40° . Хорошо виден эффект рефракции и диссипации волнения в результате потерь на донное трение.

Для получения граничных условий используются модели больших масштабов,

такие, например, как известная WAModel [4-7].

В расчетах для Каркинитского залива эффект генерации волн ветром не учитывался, так как на пространственных масштабах залива им можно пренебречь, и наиболее существенным эффектом является диссипация волновой энергии на мелком дне.

На рис. 5 приведен результат расчета двухмерной спектральной плотности в точке

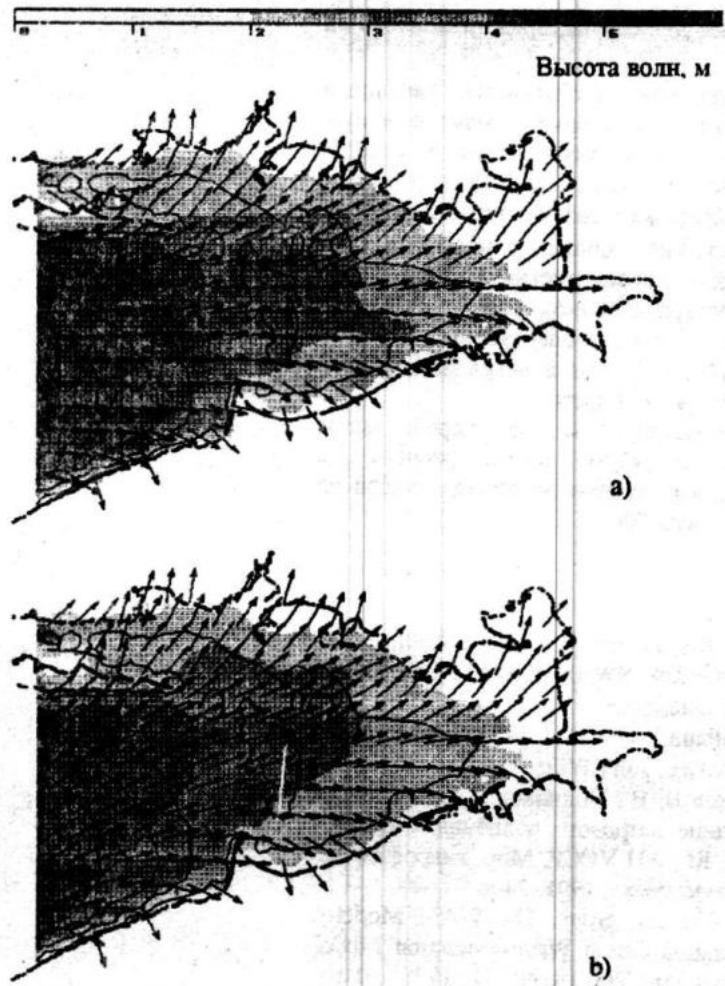


Рис. 4. Результаты счета модели: а) тестовый случай
(рефракция, диссипация), б) расчет шторма (на левой границе
высота волн 4 метра)

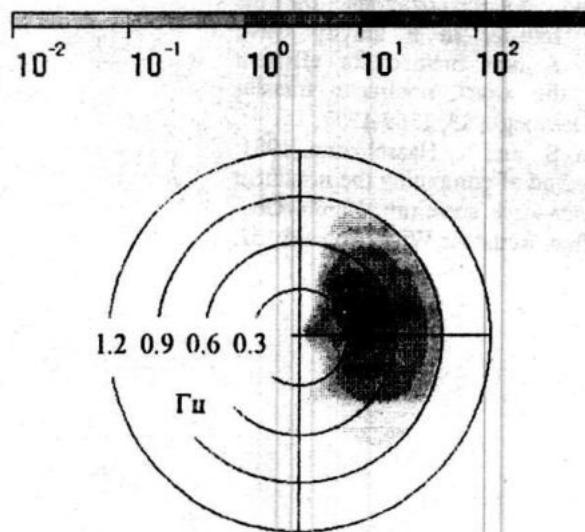


Рис. 5. Двухмерная спектральная плотность в
точке $33^{\circ} 15'$, $45^{\circ} 45'$.

$33^{\circ} 15'$, $45^{\circ} 45'$ для случая, представленного на рис. 4(а).

Таким образом, разработана численная модель ветрового волнения, предназначенная для расчета поля ветровых волн в северо-западной части Черного моря. Модель может быть применена как к анализу уже имеющихся крупномасштабных данных с целью расчета климатических характеристик в этой части моря на пространственной сетке с большим разрешением, так и для оперативных расчетов с заданным полем волн и ветра на внешней границе расчетной области.

Модель реализована на персональном компьютере Пентиум, время расчета на тестовых задачах составило около 2 часов на машине Пентиум 200.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. C. Ris, N. Booij, L. H. Holthuijsen, R. Padilla-Hernandes. SWAN Cycle 2 beta model version user manual.
2. Whitham, G. B., 1974: Linear and Nonlinear Waves, John Wiley.
3. Ефимов В. В., Полников В.Г. Численное моделирование ветрового волнения. Отв. ред. Суворов А. М.; АН УССР. Мор. гидрофиз. инт.- Киев: Наук. думка, 1991.-240с.
4. The WAMDI group. The WAM Model-A Third Generation Ocean Wave Prediction Model. J. Phys. Oceanogr., Vol. 18, No. 12, 1775-1810.
5. Hasselmann, K., and J. I. Collins, Spectral classification of finite depth gravity waves due to bottom friction, J. Mar. Res., 26, I, 1968.
6. Hasselmann, S., and K. Hasselmann, 1985: 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., 13, 1369-1377.
7. Hasselmann, S., and K. Hasselmann, 1981: A symmetrical method of computing the nonlinear transfer in a gravity-wave spectrum. Hamb. Geophys. Einzelschriften, Reihe A: Wiss. Abhand., 52, 138 pp.