

В.В.Фомин, А.А.Полозок

*Морское отделение Украинского
гидрометеорологического института, г. Севастополь*

ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ШТОРМОВЫХ НАГОНОВ И ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В АЗОВСКОМ МОРЕ НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ

Представлена технология численного моделирования штормовых нагонов и ветровых волн в Азовском море, объединяющая модель циркуляции вод *ADCIRC* и модель ветрового волнения *SWAN*. Обе модели реализованы на неструктурированной сетке и адаптированы для параллельных вычислений. Приведены результаты верификации численного алгоритма и анализ его чувствительности к вариациям входных параметров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *уровень моря, ветровое волнение, численное моделирование, неструктурированные сетки, параллельные вычисления.*

Введение. Штормовые нагоны и ветровое волнение являются одними из наиболее важных характеристик, определяющих динамику вод Азовского моря. Экстремальные подъемы уровня в сочетании с ветровым волнением могут приводить к катастрофическим последствиям. Значительная часть экстремальных штормовых ситуаций в Азовском море наблюдается в осенний и зимний периоды при сильных устойчивых ветрах восточного и северо-восточного направлений, а также при перемещении над морем глубоких циклонов с юга, запада и северо-запада.

Для моделирования экстремальных штормовых ситуаций необходимо использовать совместные модели (*coupling models*), учитывающие взаимодействия между волнами и течениями [1]. Совместные модели основываются на комбинации описывающей течения и уровень моря модели циркуляции вод и спектральной модели ветрового волнения. В [1] предложена совместная модель динамики Азовского моря, основанная на сигма-координатной модели циркуляции вод и спектральной модели волнения.

Основное достоинство этой модели – сравнительно полная параметризация механизмов взаимодействия между волнами и течениями. К ограничениям модели можно отнести то, что она реализована на достаточно грубой прямоугольной сетке для однопроцессорных систем.

Существенным шагом в повышении адекватности моделирования динамики Азовского моря является переход к неструктурированным сеткам и технологиям параллельных вычислений на многопроцессорных системах. Неструктурированные сетки легко адаптируются к изменениям береговой линии и глубин и, следовательно, более точно описывают прибрежные зоны, увеличивая пространственное разрешение там, где это необходимо. Хотя использование неструктурированных сеток и требует большего количества операций на каждый расчетный узел по сравнению с прямоугольными

сетками, за счет оптимальной триангуляции расчетной области можно существенно уменьшить общее количество расчетных узлов. Кроме того, применение неструктурированных сеток сводит к минимуму необходимость использования нестинга и интерполяции решения на жидких границах.

Цель данной работы – реализовать для Азовского моря технологию численного моделирования штормовых нагонов и ветрового волнения, использующую неструктурированные сетки и адаптированную для многопроцессорных компьютерных систем типа вычислительных кластеров.

За основу взята совместная модель *ADCIRC+SWAN*, которая недавно предложена в [2]. Она объединяет в единый программный комплекс две известные и хорошо апробированные модели – *ADCIRC* [3, 4] и *SWAN* [5, 6], которые применяются для расчета штормовых нагонов и ветрового волнения.

Модель циркуляции вод *ADCIRC*. В модели *ADCIRC* для дискретизации по пространственным переменным используется метод конечных элементов, позволяющий использовать неструктурированные сетки. Аппроксимация по времени проводится методом конечных разностей. *ADCIRC* существует как в виде проинтегрированной по глубине 2-х мерной модели (*2DDI ADCIRC*), так и в виде 3-х мерной модели (*3D ADCIRC*). В декартовой системе координат исходные уравнения модели *2DDI ADCIRC* имеют вид:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial}{\partial x} \left[\eta + \frac{P_a}{g\rho_0} \right] + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0 H} + \frac{M_x - D_x}{H}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g \frac{\partial}{\partial y} \left[\eta + \frac{P_a}{g\rho_0} \right] + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0 H} + \frac{M_y - D_y}{H}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

$$J_x = -Q_x \frac{\partial U}{\partial x} - Q_y \frac{\partial U}{\partial y} + fQ_y - \frac{g}{2} \frac{\partial \eta^2}{\partial x} - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0} +$$

$$+ (M_x - D_x) + \tau_0 Q_x + U \frac{\partial \eta}{\partial t} - gH \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$J_y = -Q_x \frac{\partial V}{\partial x} - Q_y \frac{\partial V}{\partial y} - fQ_x - \frac{g}{2} \frac{\partial \eta^2}{\partial y} - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0} +$$

$$+ (M_y - D_y) + \tau_0 Q_y + V \frac{\partial \eta}{\partial t} - gH \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

$$\tau_{sx} = \tau_{sx,wind} + \tau_{sx,wave}, \quad \tau_{sy} = \tau_{sy,wind} + \tau_{sy,wave}. \quad (6)$$

Здесь x, y, t – горизонтальные координаты и время; $H = h + \eta$ – динамическая глубина бассейна; η – отклонения свободной поверхности моря от невозмущенного состояния; h – глубина моря; U, V – средние по глубине компоненты скорости течений по осям x и y соответственно; $Q_x = UH, Q_y = VH$ – компоненты полных потоков; f – параметр Кориолиса; g – ускорение силы тяжести; P_a – атмосферное давление; ρ_0 – средняя плотность воды; ($\tau_{sx,wind}$

$\tau_{sy,wind}$) и $(\tau_{xx,wave}, \tau_{yy,wave})$ – компоненты напряжений трения, обусловленные ветром и волнами соответственно; τ_{bx}, τ_{by} – компоненты напряжений донного трения; M_x, M_y – горизонтальная турбулентная вязкость; D_x, D_y – дисперсионные слагаемые [4]; τ_0 – параметр, оптимизирующий свойства численного алгоритма.

Модель ветрового волнения SWAN. В модели *SWAN*, начиная с версии 40.72, имеется возможность использовать неструктурированные сетки, аналогичные применяемым в *ADCIRC*. Именно после выхода указанной версии *SWAN* возникла возможность ее объединения с *ADCIRC*, что и было сделано в [2].

В основу *SWAN* положена концепция частотно-углового спектра $E(x, y, t, \theta, \omega)$, где θ, ω – угловая и частотная координаты. Эволюционное уравнение для определения спектральной плотности волнового действия $N = E/\omega$ имеет следующий вид [5]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta N) + \frac{\partial}{\partial \omega}(c_\omega N) = \frac{S}{\omega}, \quad (7)$$

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{wc} + S_{bf} + S_{dib}. \quad (8)$$

Здесь $c_x, c_y, c_\theta, c_\omega$ – скорости переноса волновой энергии, определяемые на основе метода геометрической оптики [6]; S_{in} – источник энергоснабжения волн ветром; S_{nl} – механизм резонансных взаимодействий спектральных гармоник, включающий 4-х и 3-х волновые взаимодействия; S_{wc} – диссипация энергии вследствие обрушения волновых гребней; S_{bf} – диссипация энергии, обусловленная донным трением; S_{dib} – обрушение волн на критических глубинах.

Обмен данными между *ADCIRC* и *SWAN*. Программные коды *ADCIRC* и *SWAN* выполняются последовательно на одной и той же неструктурированной сетке и используют один и тот же набор *CPU*. В обеих моделях применяется интерфейс передачи сообщений *MPI*. Это дает возможность проводить расчеты на высокопроизводительных компьютерных системах типа вычислительных кластеров.

В *SWAN* волновые характеристики вычисляются на основе полей скорости ветра, течений и уровня моря, получаемых из *ADCIRC*. В свою очередь, в *ADCIRC* используются волновые напряжения, которые вычисляются в *SWAN* через градиенты радиационных напряжений по формулам [1, 2]:

$$\tau_{sx,waves} = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}, \quad \tau_{sy,waves} = -\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}, \quad (9)$$

$$S_{xx} = g\rho_0 \iint (n \cos^2 \theta + n - 1/2) E d\alpha d\theta,$$

$$S_{xy} = g\rho_0 \iint (n \sin \theta \cos \theta) E d\alpha d\theta, \quad (10)$$

$$S_{yy} = g\rho_0 \iint (n \sin^2 \theta + n - 1/2) E d\alpha d\theta, \quad (11)$$

где S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} – компоненты тензора радиационных напряжений; n – отношение групповой скорости волновой гармоники к ее фазовой скорости.

В *SWAN* используется неявная схема, требующая итераций. Поэтому расчет одного шага по времени занимает гораздо больше процессорного

времени, по сравнению с *ADCIRC*, где реализована явная схема с шагом Δt_A , требующая выполнения критерия Куранта. По этой причине интервал совмещения моделей Δt_C принимается равным шагу по времени в модели *SWAN* (Δt_W). На каждом интервале совмещения первой запускается *ADCIRC*. Она имеет доступ к волновым напряжениям в моменты времени, соответствующие началу и концу предыдущего интервала совмещения. *ADCIRC* использует эту информацию для линейной экстраполяции волновых напряжений в пределах текущего интервала совмещения. После окончания расчетов по *ADCIRC* запускается *SWAN* и определяются волновые поля на момент времени, соответствующий концу интервала совмещения. При этом в *SWAN* используются осредненные на интервале Δt_C величины скоростей ветра, течений и уровня моря.

Результаты тестовых расчетов. Изложенная выше технология совместного расчета ветрового волнения, течений и уровня Азовского моря была реализована на вычислительном кластере МГИ НАН Украины (<http://hpc-mhi.org>). Использовалась неструктурированная расчетная сетка, состоящая из 10835 конечных элементов и 6730 узлов (рис.1). Входными данными служили поля приводного ветра и приземного давления над Азово-Черноморским бассейном за ноябрь 2007 г из численной атмосферной модели *SKIRON* (<http://forecast.uoa.gr>). Пространственное разрешение атмосферных полей составляло 10 км, дискретность по времени – 2 ч. Шаги по времени в *ADCIRC* и *SWAN* принимались следующими: $\Delta t_A = 1$ с; $\Delta t_S = 600$ с.

Основное внимание уделялось анализу влияния изменения параметров модели *ADCIRC* на вариации уровня моря. Для расчета придонных касательных напряжений в *ADCIRC* использовалась квадратичная зависимость от скорости течений с гибридной аппроксимацией коэффициента трения:

$$C_d = C_{d0} \left[1 + (H_b/H)^a \right]^{b/a}, \quad (12)$$

где C_{d0} – минимальное значение коэффициента трения; $a = 10$ – безразмерный параметр, определяющий скорость роста донного трения когда глубина больше или меньше глубины обрушения волн; $H_b = 1$ м; $b = 1/3$ – параметр, определяющий, как увеличивается донное трение с уменьшением глубины.

Следует отметить, что уровень моря в *ADCIRC* определяется из решения проинтегрированного по глубине уравнения неразрывности, представленного в форме обобщенного волнового уравнения (3) с произвольным параметром τ_0 , величина которого оценивается из неравенства:

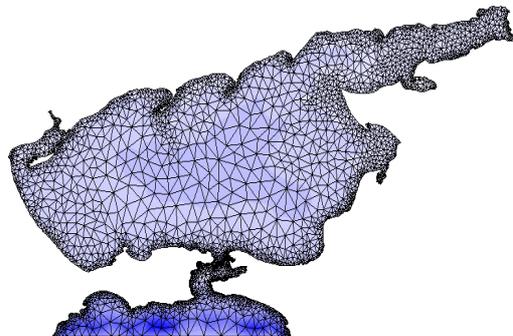
$$1 < \tau_0 / \tau_{\max} \leq 10,$$

(13)

$$\tau_{\max} = \max \left| C_d \sqrt{U^2 + V^2} / H \right|.$$

Как показали предварительные расчеты, для выбранной расчетной сетки приемлемое значение

Рис. 1. Неструктурированная расчетная сетка для моделирования волнения, течений и уровня Азовского моря.



τ_0 находится в пределах 0,0025 – 0,005.

Результаты модельных расчетов уровня моря за ноябрь 2007 г сопоставлялись с данными натурных наблюдений на береговых гидрометеорологических станциях (ГМС). Эти данные представляли собой ежечасные измерения уровня самописцами на ГМС Геническ и Мариуполь и измерения по футштоку в основные синоптические сроки (через каждые 6 ч) на ГМС Бердянск и Мысовое. Результаты сопоставления показаны на рис.2. Как видно, модель достаточно адекватно описывает измеренные вариации уровня моря. Имеет место хорошее воспроизведение фаз подъемов и спадов. Модель удовлетворительно воспроизвела особо опасный подъем уровня 11 ноября 2007 г на ГМС Бердянск.

Если принять во внимание, что модельные атмосферные поля имеют достаточно грубое разрешение, а положения измерителей уровня на ГМС не совпадают с узлами расчетной сетки, то полученный результат следует признать вполне удовлетворительным. Можно предположить, что более подробный учет рельефа дна и береговой линии приведет к еще большему снижению ошибок расчетов.

В уравнениях модели *ADCIRC* (1) – (6) в качестве внешних воздействий (форсинга) используются поверхностные напряжения (τ_{xx} , τ_{yy} – сумма касательных напряжений ветра и волновых напряжений) и горизонтальные градиенты атмосферного давления. Представляет интерес выяснить, какая из компонентов форсинга является определяющей.

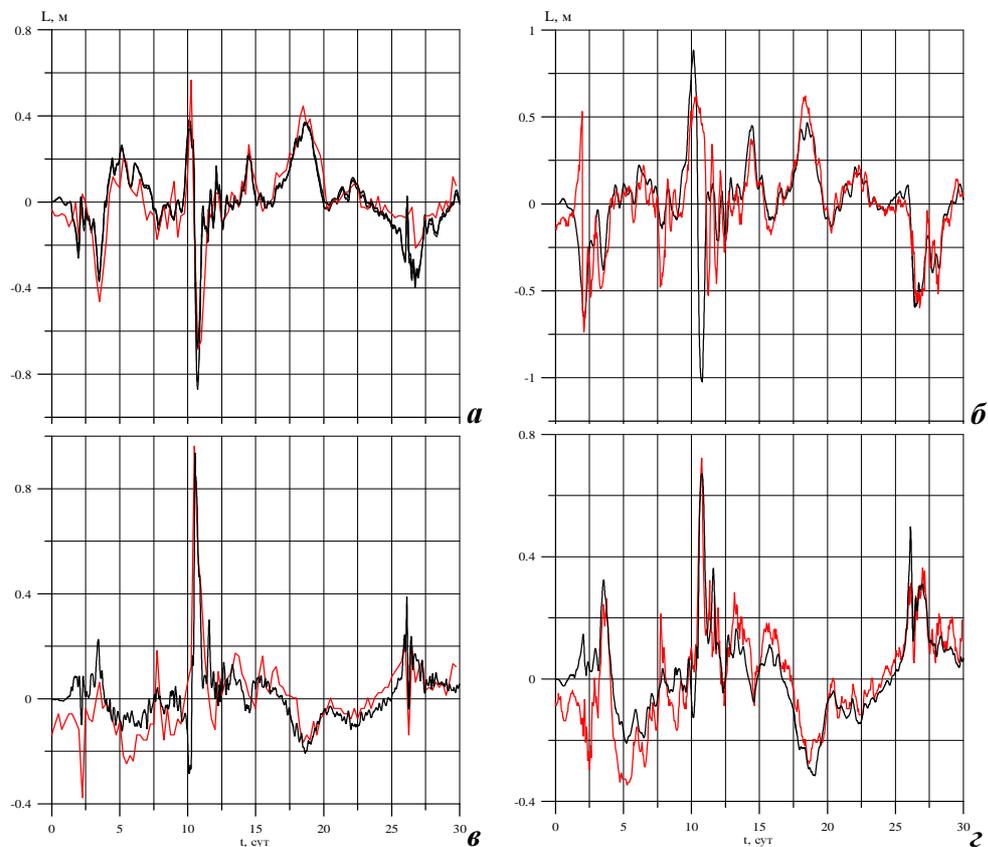
Как показали расчеты, основной вклад в формирование вариаций уровня моря вносят поверхностные напряжения. В свою очередь, учет градиентов атмосферного давления приводит к изменениям уровня всего на 2 – 3 см. Таким образом, этой компонентой форсинга можно в первом приближении пренебречь. В качестве примера на рис.3 показаны вариации уровня на ГМС Бердянск при разных типах форсинга.

Для оценки влияния донного трения на вариации уровня моря минимальный коэффициент трения C_{d0} в формуле (13) изменялся в пределах от 0,0025 до 0,01. Как показали результаты расчетов, увеличение C_{d0} в указанных пределах приводит к уменьшению максимальных значений уровня моря на 0,3 м. При этом на максимальных понижениях уровня моря величина C_{d0} сказывается в меньшей степени. На рис.4 показан пример влияния C_{d0} на вариации уровня на ГМС Мариуполь.

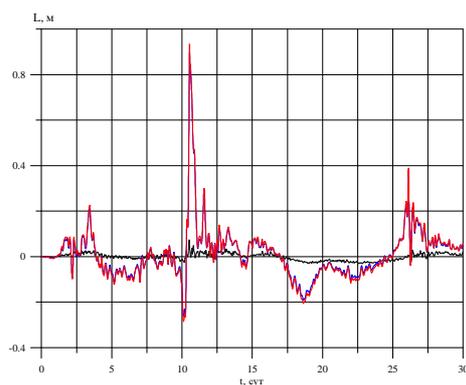
Заключение. Реализована технология численного моделирования штормовых нагонов и ветровых волн в Азовском море на неструктурированной сетке, основанная на параллельной версии совместной модели *ADCIRC+SWAN* [2].

Результаты сопоставления расчетных данных с данными наблюдений показали, что *ADCIRC+SWAN* достаточно адекватно описывает измеренные вариации уровня моря. Имеет место хорошее воспроизведение фаз подъемов и спадов. Модель удовлетворительно воспроизвела особо опасный подъем уровня 11 ноября 2007 г. на ГМС Бердянск.

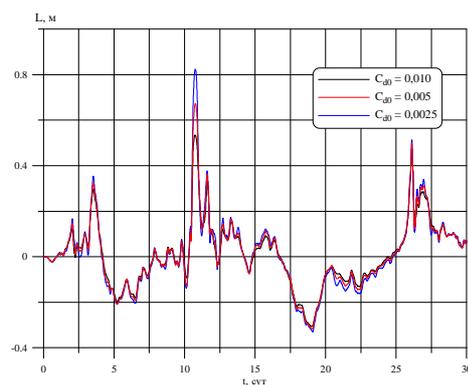
Установлено, что основной вклад в формирование вариаций уровня моря вносят поверхностные напряжения. Показана важность выбора оптимального



Р и с . 2 . Вариации уровня Азовского моря на ГМС Мысовое (а), Геническ (б), Бердянск (в), Мариуполь (г) в ноябре 2007 г. (красная кривая – измерения, черная кривая – данные моделирования).



Р и с . 3 . Вариации уровня Азовского моря на ГМС Бердянск в ноябре 2007 г. по данным моделирования при разных типах форсинга: красная кривая – касательные напряжения и градиент давления; синяя кривая – только касательные напряжения; черная кривая – только градиент давления.



Р и с . 4 . Влияние придонных касательных напряжений на вариации уровня Азовского моря на ГМС Мариуполь в ноябре 2007 г. по данным моделирования при разных значениях C_{d0} .

значения коэффициента донного трения для правильного воспроизведения максимальных подъемов уровня.

Для дальнейшего усовершенствования изложенной технологии моделирования штормовых нагонов и ветрового волнения предполагается построить более подробную неструктурированную расчетную сетку для всего Азово-Черноморского бассейна, а также учесть речной сток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.А., Фомин В.В.* Математическое моделирование динамических процессов в зоне море-суша.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008.– 363 с.
2. *Dietrich J.C., Zijlema M., Westerink J.J., Holthuijsen L.H., Dawson C., Luettich R.A., Jensen R., Smith J.M., Stelling G.S., Stone G.W.* Modeling Hurricane Waves and Storm Surge using Integrally-Coupled, Scalable Computations // *Coastal Engineering*.– 2011.– v.58, issue 1.– P.45-65.
3. *Luettich R.A., Westerink J.J., Scheffner N.W.* ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts and estuaries. Report 1: Theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL.– Dredging Research Program Technical Report DRP-92-6.– U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1992.– 137 p.
4. *Luettich R.A., Westerink J.J.* Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC; 2004. http://adcirc.org/adcirc_theory_2004_12_08.pdf
5. *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.
6. *Holthuijsen L.H.* Waves in oceanic and coastal waters.– Cambridge: Cambridge University Press, 2007.– 387 p. <http://www.cambridge.org/9780521860284>. ISBN 0-521-86028-8. XVI.
7. *Zijlema M.* Computation of wind-wave spectra in coastal waters with SWAN on unstructured grids // *Coastal Engineering*.– 2010.– v.57, issue 3.– P.267-277.

Материал поступил в редакцию 27.08.2013 г.

АНОТАЦІЯ Представлена технологія чисельного моделювання штормових нагонів і вітрових хвиль в Азовському морі, що об'єднує модель циркуляції вод *ADCIRC* і модель вітрового хвилювання *SWAN*. Обидві моделі реалізовані на неструктурованій сітці і адаптовані для паралельних обчислень. Наведено результати верифікації чисельного алгоритму і аналіз його чутливості до варіацій вхідних параметрів.

ABSTRACT The technology of numerical modeling of storm surge and wind waves in the Sea of Azov, unifying model of the *ADCIRC* ocean circulation model and *SWAN* wind waves model. Both models are implemented on unstructured mesh and adapted for parallel computing. The results numerical algorithm verification and analysis of its sensitivity to variations in input parameters are given.