

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ОТКЛИК
АЗОВСКОГО МОРЯ НА
ПРОХОЖДЕНИЕ
ЦИКЛОНИЧЕСКОГО
АТМОСФЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

*А.Е. Букатов, Д.Д. Завьялов,
В.Н. Белокопытов, Т.А. Соломаха*

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: mhi.iuf.net

На основе гидродинамической конечно-элементной модели выполнено исследование реакции урвненной поверхности и поля скорости волновых течений в Азовском море на изменение штормовых условий 14 – 16 ноября 1992 года, вызванных прохождением циклона.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу о динамике воды в Азовском море. В основу математической модели положены проинтегрированные по вертикали уравнения движения мелкой воды, записанные через две компоненты горизонтального потока количества жидкости $q_{1,2}$ и сумму $H = \zeta + h$ отклонения свободной поверхности ζ от невозмущенного уровня и глубины h бассейна [1, 2]

$$\begin{aligned} q_{1t} + A_1 &= B_1, \\ q_{2t} + A_2 &= B_2, \\ q_{1x} + q_{2y} + (\rho H)_t &= 0, \\ A_1 &= \rho^{-1} [(q_1^2 H^{-1})_x + (q_1 q_2 H^{-1})_y], \\ A_2 &= \rho^{-1} [(q_1 q_2 H^{-1})_x + (q_2^2 H^{-1})_y], \\ B_1 &= f q_2 + \gamma^2 \rho_a W^2 \cos \theta - \\ &- g \rho^{-1} (CH)^{-2} q_1 (q_1^2 + q_2^2)^{\frac{1}{2}} - \rho g H \xi_x - H P_x, \\ B_2 &= -f q_1 + \gamma^2 \rho_a W^2 \sin \theta - \\ &- g \rho^{-1} (CH)^{-2} q_2 (q_1^2 + q_2^2)^{\frac{1}{2}} - \rho g H \xi_y - H P_y. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь u, v – составляющие мгновенной скорости жидких частиц; g – ускорение силы тяжести; f – параметр Кориолиса; P – атмосферное давление на поверхности воды; ρ, ρ_a – плотность воды и воздуха; W – скорость ветра; θ – угол между осью x и

направлением ветра; C – коэффициент Шези; γ – коэффициент ветрового напряжения.

Горизонтальные втекающие потоки не моделировались, обе составляющие скорости на границах расчетной области принимались равными нулю. Начальные условия задавались в виде $H(x, y, t = 0) = H_0$, $q_i(x, y, t = 0) = 0, i = 1, 2$. На границе расчетной области задавалось условие непротекания $q_i = 0$.

Численное решение дифференциальных уравнений в частных производных (1) осуществлялось методом конечных элементов [2]. Для получения дискретного аналога этих уравнений переменные q_i, H выражались через линейные интерполяционные функции ϕ по формулам $q_i = \phi^T q_i^n$; $H = \phi^T H^n$. Знак T означает транспонирование.

Тогда уравнения движения для одного элемента S представляются в матричном виде:

$$\begin{aligned} \delta q_i^{n,T} (M(q_i^n)_i - F_i) &= 0, \\ \delta H^{n,T} (\rho M(H^n)_i - F_H) &= 0, \\ M &= \int \int \phi \phi^T dS, \\ F_i &= \int \int (\phi B_i - \phi A_i) dS, \\ F_H &= \int \int (q_i)_x - (q_{i+1})_y dS, i = 1, 2. \end{aligned} \quad (2)$$

Общая система дифференциальных уравнений для всей расчетной области, объединяющая уравнения, записанные для каждого ее элемента, приводится к виду

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{L}} = \mathbf{F}(\mathbf{L}_0) \quad (3)$$

Здесь \mathbf{M} – матрица массы для всей области, $\dot{\mathbf{L}}$ – производные по времени от массового расхода и возвышения поверхности во всех узлах расчетной сетки. Все другие члены включены в \mathbf{F} и вычисляются при $t = t_0$ или, при использовании итераций, в конце временного шага по предыдущей итерации. Для интегрирования по времени уравнения (3) применялся метод трапеций.

Численный эксперимент и анализ его результатов. На основе разработанной модели было проведено численное моделирование отклика Азовского моря на изменение гидрометеорологической ситуации,

наблюдавшейся 14 – 16 ноября 1992 г. Расчетная область содержала 123 узловые точки и была разбита на 193 линейных треугольных элемента. Коэффициент Шези рассчитывался как $C = \chi^2 Ln^{-2}(H/z_0)$ [3], где $\chi = 0,4$ – постоянная Кармана, а $z_0 = 0,01$ – параметр шероховатости донной поверхности. Коэффициент ветрового напряжения принимался равным [4]

$$0,0012 \text{ при } W \leq 11 \text{ м/с;}$$

$$0,001(0,49 + 0,065W) \text{ при } W > 11 \text{ м/с.}$$

При этом параметр Кориолиса, определенный для 46° с.ш., равнялся $1,046 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Шаг по времени Δt принимался равным 180 с в соответствии с критерием

$$\Delta t < \frac{1}{\sqrt{2}} \Delta x (gh)^{-1/4}. \text{ В качестве исходных}$$

использовались данные реанализа атмосферных полей ERA-40, подготовленного в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды ECMWF [5] с пространственным разрешением $1,125^\circ \times 1,125^\circ$ и дискретностью 6 часов. Атмосферное давление, направление и скорость ветра в узлах расчетной сетки рассчитывались путем двумерной сплайн-интерполяции на каждом временном шаге.

Особенностью рассмотренной ситуации было то, что в это время над акваторией Азово-Черноморского бассейна проходил достаточно быстрый средиземноморский циклон, вызвавший сильный шторм. Он перемещался с большой скоростью (60 км/час) с юга Апеннинского полуострова через Грецию на юго-западную часть Черного моря. На образование шторма оказали влияние северо-западный атмосферный перенос над Западной Европой, активная высотная фронтальная зона, наличие струйного течения, обусловившего заток холода через Балканы на Черное море и вынос тепла на юго-восточную часть Черного моря. Вынос тепла способствовал углублению циклона и усилил фронтальный раздел. К 3 часам 15 ноября атмосферное давление в центре циклона составило 995 мб. Скорость ветров южного и юго-западного направлений возросла до 15 – 20 м/с, местами до 30 м/с. В дальнейшем перепад давления на западе Черного моря достиг 30 мб, давление в центре циклона

уменьшилось до величины 985 мб. Ветер изменил направление на западное и северо-западное с увеличением скорости до 20 – 25 м/с, местами до 30 – 40 м/с. Быстрое смещение циклона на северо-восток привело к постепенному ослаблению ветра до 10 – 15 м/с, а к 23 часам 15 ноября до 8 – 12 м/с. Эта штормовая ситуация характеризовалась еще и тем, что температура поверхностных вод к середине ноября 1992 г. имела относительно высокие значения. Перепад температуры воды и воздуха достигал 10 – 12°. Как показывает статистический анализ наблюдений, подобные штормы повторяются с периодичностью один раз в 7-10 лет, но их разрушающее действие всегда выражено очень ярко. Похожие штормовые гидрометеорологические ситуации наблюдались и в октябре 1969 г., и в ноябре 1981 г. Схематическое движение центра циклона изображено на рисунке 1.

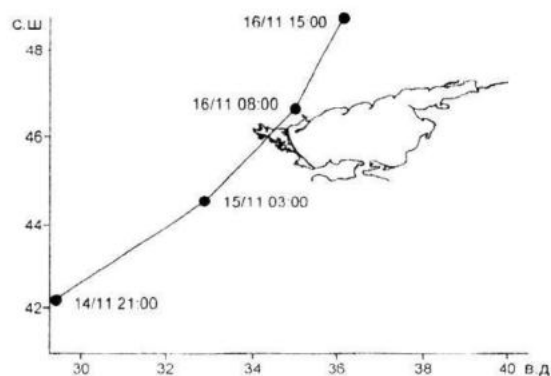
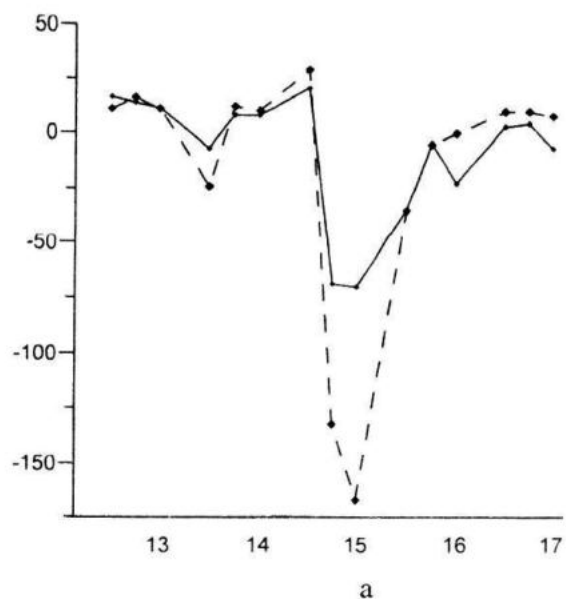


Рисунок 1 – Схематическая траектория движения центра циклона с 14/11 21:00 по 15/11 15:00

По данным расчетов, наибольший отклик уровня моря на циклон проявился в течение последующих 15 часов с момента прохождения над акваторией зоны максимальных ветров (9:00 15 ноября). Как показали расчеты, у восточных и западных берегов циклон вызвал значительные колебания уровня как выше, так и ниже невозмущенного состояния, в то время как у северного побережья реализовались только экстремальные нагоны, а у южного – экстремальные сгоны. Наибольшие значения нагонов получены в Ясенском, а сгонов – в Арабатском заливах.

Результаты численного эксперимента были сопоставлены с данными фактического изменения уровня, полученными на уровневых постах Геническа и Мариуполя

с помощью самописцев уровня моря с дискретностью 6 часов. На рис.2 изображена временная зависимость изменения уровня



свободной поверхности моря в Геническе (а) и Мариуполе (б).

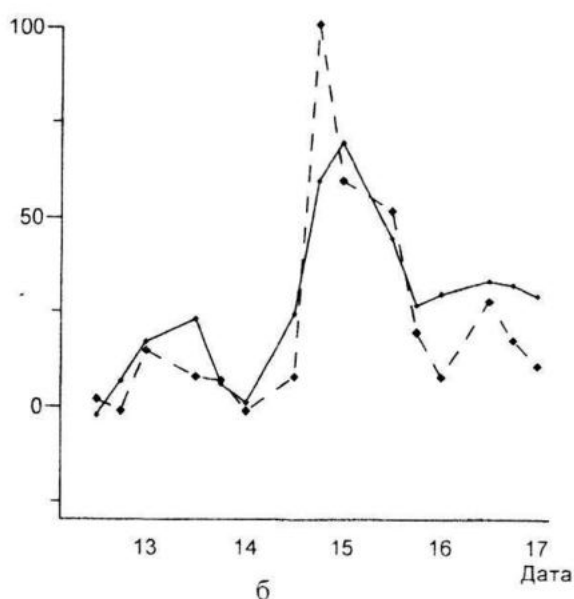


Рисунок 2 – Временная зависимость изменения уровня свободной поверхности моря в Геническе (а) и Мариуполе (б). Сплошные линии представляют результаты математического моделирования, штриховые линии отвечают данным натурных измерений

Сплошные линии представляют результаты математического моделирования, а штриховые линии отвечают данным натурных измерений. Видно, что модельные расчеты удовлетворительно описывают основные черты сгонно-нагонных колебаний в рассматриваемых пунктах. Следует отметить, что расчеты дали несколько заниженные значения максимальных отклонений уровня. Это может быть связано как с весьма условным совпадением местоположения пункта измерения и точки на расчетной области, сопоставляемой ему, так и с точностью соответствия реальным условиям силы и направления ветра в используемом массиве данных.

Заключение. На основе построенной гидродинамической модели выполнено исследование реакции уровенной поверхности в Азовском море на изменение штормовых условий 14 – 16 ноября 1992 года, вызванных прохождением циклона. Проведено сопоставление полученных результатов расчетов с имеющимися данными фактического изменения уровня, показавшее удовлетворительные значения оправдыва-

емости расчетных величин и их корреляции с фактическими данными.

Литература

1. А.Е. Букатов, Д.Д. Завьялов, Т.А. Соломаха. Численное моделирование динамики Азовского моря при сгонно-нагонных явлениях. *Метеорология и гидрология*, № 6. 2006. – С. 69 – 75.
2. Дж. Коннор, К. Бреббиа. *Метод конечных элементов в механике жидкости*. – Л.: Судостроение, 1970. – 269 с.
3. A.F. Blumberg, G.L. Mellor. A description of three-dimensional coastal ocean circulation model in Three – Dimensional Coast Ocean Models. – *Coast. Estuar. Sci.*, 1987, № 4, P. 1 – 16.
4. G.L. Mellor, T. Yamada. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem. – *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1982, № 20, P. 851 – 875.
5. S.M. Uppala et al. The ERA-40 reanalysis. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2961-3012.doi:10.1256/qj.04.176, 2005.