

Численное моделирование динамики Азовского моря при прохождении циклонического атмосферного образования

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

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

Введение

Колебания уровня в Азовском море, обусловленные ветром, являются доминирующими в динамике вод по причине мелководности водоема. Сгонно-нагонные колебания, возникающие под действием штормовых ветров, являются опасными природными явлениями. На величину этих колебаний влияют направление, сила и продолжительность действия ветра, ориентация береговой линии относительно преобладающих ветров. Значительные сгонно-нагонные колебания уровня Азовского моря чаще всего наблюдаются осенью и зимой и несколько реже весной, что объясняется активизацией циклонической деятельности. Нагонные наводнения приводят к затоплению обширных участков побережья, наносят ущерб природе и хозяйству. При сгонах уменьшается глубина в портах и судоходных каналах, обнажаются участки дна. Поэтому вопрос прогноза сгонно-нагонных колебаний Азовского моря актуален для обеспечения безопасности судоходства и ведения хозяйственной деятельности в прибрежной зоне.

Гидродинамическое моделирование сгонно-нагонных явлений, вызванных ветрами постоянного действия, проведено в [1, 3, 6]. Изучению длинных баротропных волн, генерируемых в Азовском море движущейся с постоянной скоростью областью возмущений атмосферного давления, посвящена работа [2]. В настоящей работе на основе гидродинамической конечно-элементной модели выполнено исследование реакции уровенной поверхности и поля скорости волновых течений в Азовском море на изменение штормовых условий 14—16 ноября 1992 г., вызванных прохождением циклона.

* Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины; e-mail: newisland@list.ru.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу о динамике воды в Азовском море. За основу математической модели примем проинтегрированные по вертикали уравнения неразрывности и движения мелкой воды, записанные через две составляющие горизонтального потока количества жидкости $q_1 = \int_{-h}^{\zeta} u dz$, $q_2 = \int_{-h}^{\zeta} v dz$ и сумму $H = \zeta + h$ отклонения свободной поверхности ζ от невозмущенного уровня и глубины h моря [4]:

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

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 $H(x, y, t = 0) = H_0$, $q_i(x, y, t = 0) = 0$, $i = 1, 2$.

Численное решение дифференциальных уравнений в частных производных (1) осуществлялось методом конечных элементов [4]. 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:

$$\begin{aligned} \delta q_i^{n,T} (M(q_i^n)_t - F_i) &= 0, \\ \delta H^{n,T} (\rho M(H^n)_t - F_H) &= 0, \\ M &= \iint \phi \phi^T dS, \\ F_i &= \iint (\phi B_i - \phi A_i) dS, \\ F_H &= \iint [(q_1)_x - (q_2)_y] dS, \quad i = 1, 2. \end{aligned} \quad (2)$$

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.

Расчетная область содержала 123 узловые точки и была разбита на 193 линейных треугольных элемента. Атмосферное давление, направление и скорость ветра в узлах расчетной сетки рассчитывались путем двумерной сплайн-интерполяции на каждом временном шаге.

Численный эксперимент

На основе разработанной модели проведено численное моделирование отклика Азовского моря на изменение гидрометеорологической ситуации, наблюдавшейся 14—16 ноября 1992 г. Коэффициент Шези рассчитывался по формуле $C = \chi^2 \ln^{-2}(H/z_0)$, где $\chi = 0,4$ — постоянная Кармана; $z_0 = 0,01$ — параметр шероховатости донной поверхности [7]. Коэффициент ветрового напряжения принимался равным 0,0012 при $W \leq 11$ м/с и $0,001(0,49 + 0,065W)$ при $W > 11$ м/с [8]. 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 $\Delta t < \frac{1}{\sqrt{2}} \Delta x (gh)^{-1/4}$. В качестве ис-

ходных использовались данные реанализа атмосферных полей ERA-40, подготовленного в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды ECMWF [9] с пространственным разрешением $1,125 \times 1,125^\circ$ и дискретностью 6 ч.

Особенностью рассмотренной ситуации было то, что в это время над акваторией Азово-Черноморского бассейна проходил достаточно быстрый средиземноморский циклон, вызвавший сильный шторм. Поле ветра с 21 ч 14 ноября по 15 ч 15 ноября (время московское) схематически изображено на рис. 1, а в табл. 1 представлены радиус циклона R , скорость перемещения его центра V , давление в центре p и перепад давления Δp .

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. Эта штормовая ситуация характеризовалась еще и тем, что температура поверхностных вод к середине ноября 1992 г. была относительно высокой. Перепад температуры воды и воздуха достигал $10\text{—}12^\circ\text{C}$. 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 в октябре 1969 г. и в ноябре 1981 г.

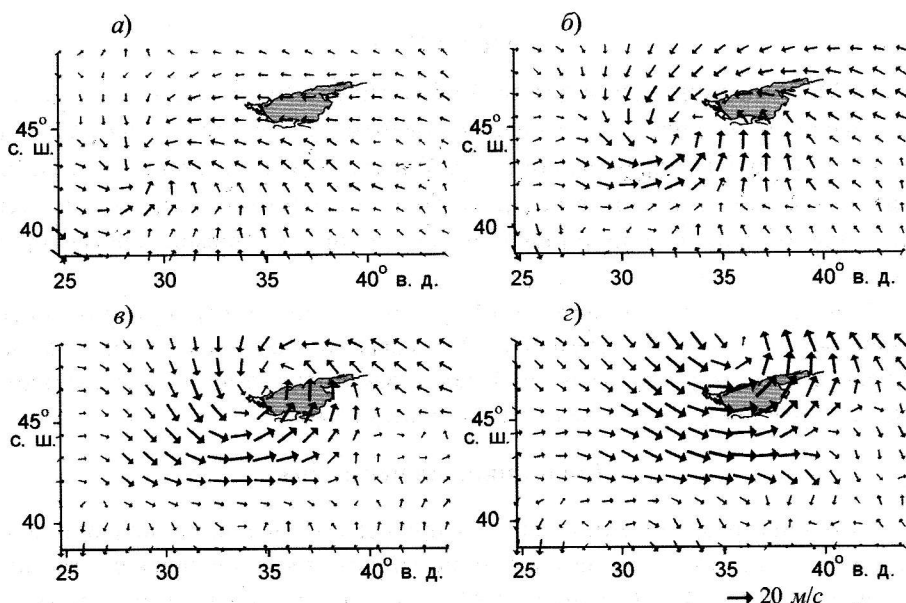


Рис. 1. Поле ветра над Азово-Черноморским бассейном при прохождении циклона 14 и 15 ноября 1992 г.

а) 21 ч 14 ноября; б) 3 ч 15 ноября; в) 9 ч 15 ноября; г) 15 ч 15 ноября 1992 г.

Ночью 14 ноября над Азовским морем преобладал умеренный юго-западный ветер скоростью 7—9 м/с, сменившийся утром на слабый ветер западного направления. Как показали расчеты, ветра этих направлений вызвали сгон (рис. 2а) на обширной территории в западной и центральной частях моря. К 9 ч утра 14 ноября поверхность части моря западнее условной линии, соединяющей Бердянскую косу на севере и район Ачуево на юго-востоке, была ниже своего невозмущенного уровня на 4—8 см. Величина нагона в противоположной северо-восточной части была в среднем около 11 см и только в Таганрогском заливе доходила до 40 см. Расчетные скорости волновых течений в данный период оказались относительно невелики и лишь у входа в Таганрогский залив и вблизи косы Долгой превышали 15 см/с (рис. 2б).

Таблица 1

Характеристики атмосферного образования, проходившего над Азово-Черноморским бассейном 14—16 ноября 1992 г.

Дата	Время, ч	R, км	V, м/с	p	Δp
				гПа	
14	21	330	13	999,5	5,5
15	3	370	10	992,5	11,3
15	9	280	9	988,3	13,6
15	15	270	8	987,4	12,8

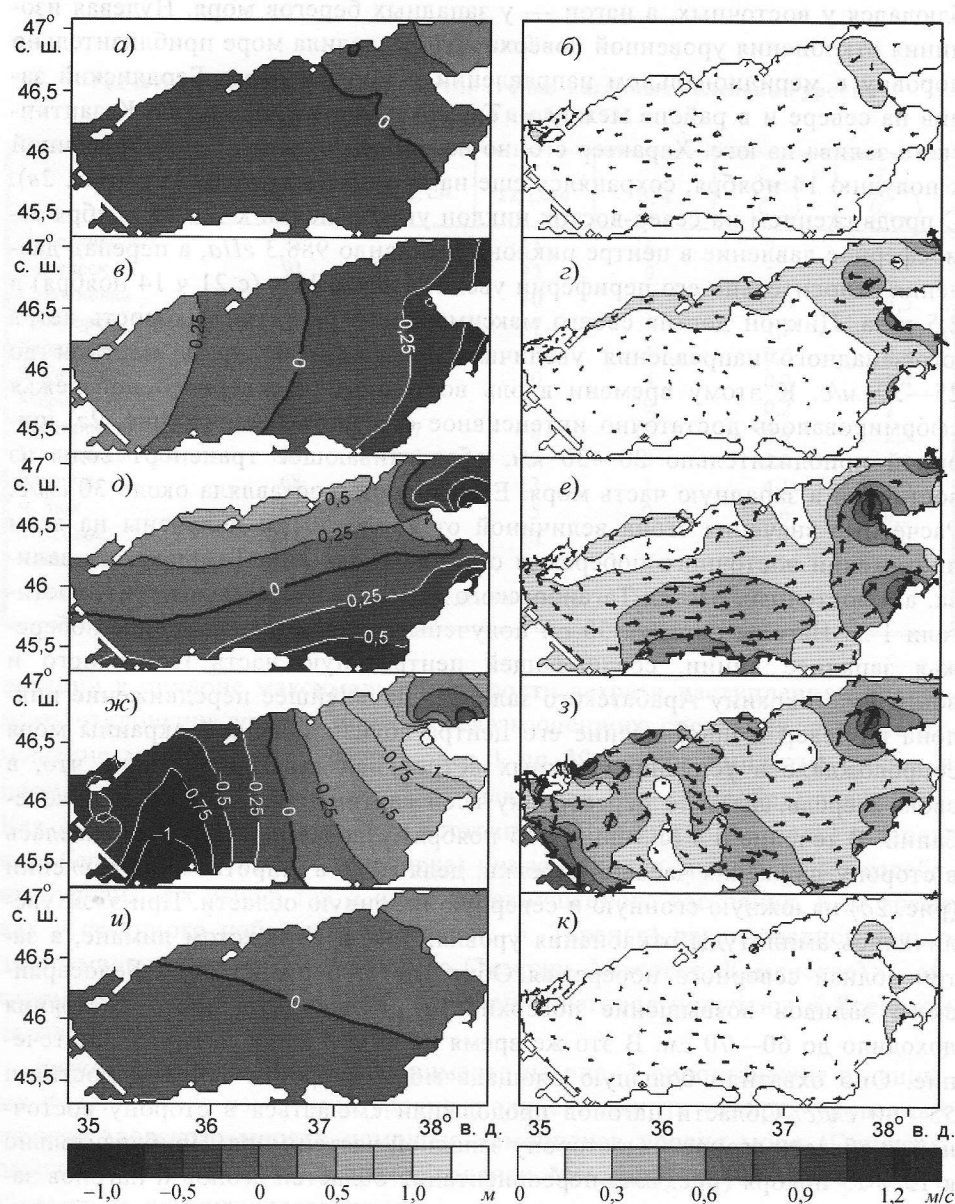


Рис. 2. Рассчитанная эволюция отклонений уровня поверхности (м; а, в, д, ж, и) и поля скорости течений (б, г, е, з, к) во время штормовой ситуации 14—16 ноября 1992 г.

а, б — 9 ч 14 ноября; в, г — 3 ч 15 ноября; д, е — 9 ч 15 ноября; ж, з — 15 ч 15 ноября; и, к — 21 ч 16 ноября 1992 г.

Во второй половине дня 14 ноября акватория Азовского моря оказалась в зоне действия движущегося с юго-запада циклона. Ветер усилился и изменил направление на юго-восточное и восточное. Приблизительно с 12 ч 14 ноября характер отклонения уровня моря от невозмущенного состояния по сравнению с началом суток изменился на противоположный. Сгон на-

блюдался у восточных, а нагон — у западных берегов моря. Нулевая изолиния отклонения уровенной поверхности разделила море приблизительно поровну в меридиональном направлении и прошла через Бердянский залив на севере и в районе между м. Тархан и восточной частью Казантипского залива на юге. Характер сгонно-нагонной картины, сформированной к полудню 14 ноября, сохранялся еще на протяжении около 15 ч (рис. 2в). С продвижением на север-восток циклон углублялся, и к 9 ч 15 ноября атмосферное давление в центре циклона составило 988,3 гПа, а перепад давления относительно его периферии увеличился за 12 ч (с 21 ч 14 ноября) в 2,5 раза. Циклон достиг своего максимального развития. Скорость ветра юго-западного направления увеличилась до 15–20 м/с, а местами до 25–30 м/с. К этому времени вдоль восточного и северного побережья сформировалось достаточно интенсивное струйное течение (рис. 2г) шириной приблизительно 20–30 км, обеспечивающее транспорт воды из восточной в западную часть моря. Его скорость составляла около 30 см/с. Расчетные значения сгона величиной от 25 до 50 см получены на всем протяжении восточного побережья от Кривой косы до Темрюкского залива, а в восточных частях Таганрогского и Ясенского заливов сгоны достигали 1 м. Нагоны порядка 50 см получены вдоль всего западного побережья западнее линии, соединяющей центральную часть Обиточного и восточную окраину Арабатского заливов. Дальнейшее передвижение циклона на север и прохождение его центра вблизи западной окраины моря сопровождалось усилением южных ветров над акваторией моря, что, в свою очередь, вызвало перестройку всей картины сгонно-нагонных колебаний. В течение 6 ч (с 3 до 9 ч 15 ноября) узловая линия поворачивалась в сторону движения часовой стрелки, деля море в широтном направлении (рис. 2д) на южную сгонную и северную нагонную области. При этом увеличились амплитуды отклонения уровня. Так, в Утлюкском лимане, а затем вблизи северного побережья Обиточного, Бердянского и Белосарайского заливов возвышение поверхности от невозмущенного состояния доходило до 60–70 см. В это же время на юге усилилось восточное течение. Оно охватило большую площадь моря, скорости течений достигли 55–60 см/с. Области нагонов продолжили смещаться в сторону восточной, а области сгонов — в сторону западной частей моря. Приблизительно к 15 ч 15 ноября (рис. 2ж) переориентация областей сгонов и нагонов завершилась, и после этого уровень моря в его восточной части оставался еще около суток выше, а в западной части — ниже невозмущенного состояния. К вечеру 16 ноября (рис. 2и, к) последствия прошедшего циклона в отклике моря практически не наблюдаются.

По данным расчетов, наибольший отклик уровня моря на циклон проявился в течение последующих 15 ч с момента прохождения над акваторией зоны максимальных ветров (9 ч 15 ноября). В табл. 2 для 13 районов Азовского моря, расположенных вдоль его побережья, представлены расчетные значения максимальных поднятий $\zeta_{\max}$ и опусканий $\zeta_{\min}$ уровня; средняя скорость его изменения $\Omega = \frac{|\zeta_{\max} - \zeta_{\min}|}{\Delta t}$, Δt — время, прошедшее между возникновениями экстремумов; δ — интервал между временем реа-

Таблица 2

Расчетные значения характеристик сгонно-нагонных колебаний уровня
Азовского моря в ноябре 1992 г.

Район	$\zeta_{\min}, \text{ см}$	$\zeta_{\max}, \text{ см}$	$\Omega, \text{ см/ч}$	$\delta, \text{ ч}$	$\frac{\zeta_{\min}}{\langle \zeta_{\min} \rangle}$	$\frac{\zeta_{\max}}{\langle \zeta_{\max} \rangle}$
Счастливецво	82	50	11	6	2	1,6
Геническ	91	54	12	9	2	2
Степановка	62	53	10	9	2,8	3,5
Приморск	26	62	7	1	1,5	6,2
Бердянск	3	72	9	1	0,5	4,8
б. Таранья	13	96	10	4	0,7	5,4
Мариуполь	6	71	5	9	0,2	2
Таганрогский залив	33	107	8	15	0,9	2,5
Приморско-Ахтарск	122	165	25	10	3,5	4,1
Темрюк	68	37	13	1	4,1	1,9
м. Зюк	85	3	5	9	5,6	0,2
Мысовое	121	19	10	7	7	0,9
Каменское	148	23	13	6	5,7	0,8

Примечание. Описание характеристик приведено в тексте.

лизации в циклоне максимальной скорости ветра и наступлением экстремума отклонения уровня моря от невозмущенного состояния, а также отношение максимальных за период с 1 по 30 ноября амплитуд сгонов и нагонов к их средним $\langle \zeta_{\min} \rangle$, $\langle \zeta_{\max} \rangle$ (исключая 14—16 ноября) значениям. Как видно из данных табл. 2, у восточных (Приморско-Ахтарск) и западных берегов (Геническ, Степановка) циклон вызвал значительные колебания уровня как выше, так и ниже невозмущенного состояния, в то время как у северного побережья (Бердянск, б. Таранья) реализовались только экстремальные нагоны, а у южного (Темрюк, Мысовое, Каменское) — экстремальные сгоны. Наибольшие значения нагонов получены в Ясенском заливе, а сгонов — в Арабатском.

Результаты численного эксперимента на рис. 3 сопоставлены с данными фактического изменения уровня, полученными на четырех уровнях постах Азовского моря с помощью самописцев уровня моря (Геническ, Мариуполь) и водомерных реек (Бердянск, Мысовое) с дискретностью 6 ч. Сплошные линии представляют результаты математического моделирования, штриховые — данные натурных измерений. Видно, что модельные расчеты, выполненные в течение месяца, удовлетворительно описывают основные черты сгонно-нагонных колебаний в рассматриваемых пунктах.

Количественные оценки сравнения расчетных и фактических величин приведены в табл. 3. Для каждого из четырех пунктов в таблице представлены средняя абсолютная $|\Delta| = \left(\sum_1^N |\zeta_{\phi} - \zeta_p| \right) / N$ и средняя квадратическая

$$\sigma = \sqrt{\left(\sum_1^N (\zeta_{\phi} - \zeta_p)^2 \right) / N}$$

ошибки расчетов, оправдываемость P_n и коэффициент корреляции R_n между фактическими и прогностическими значениями

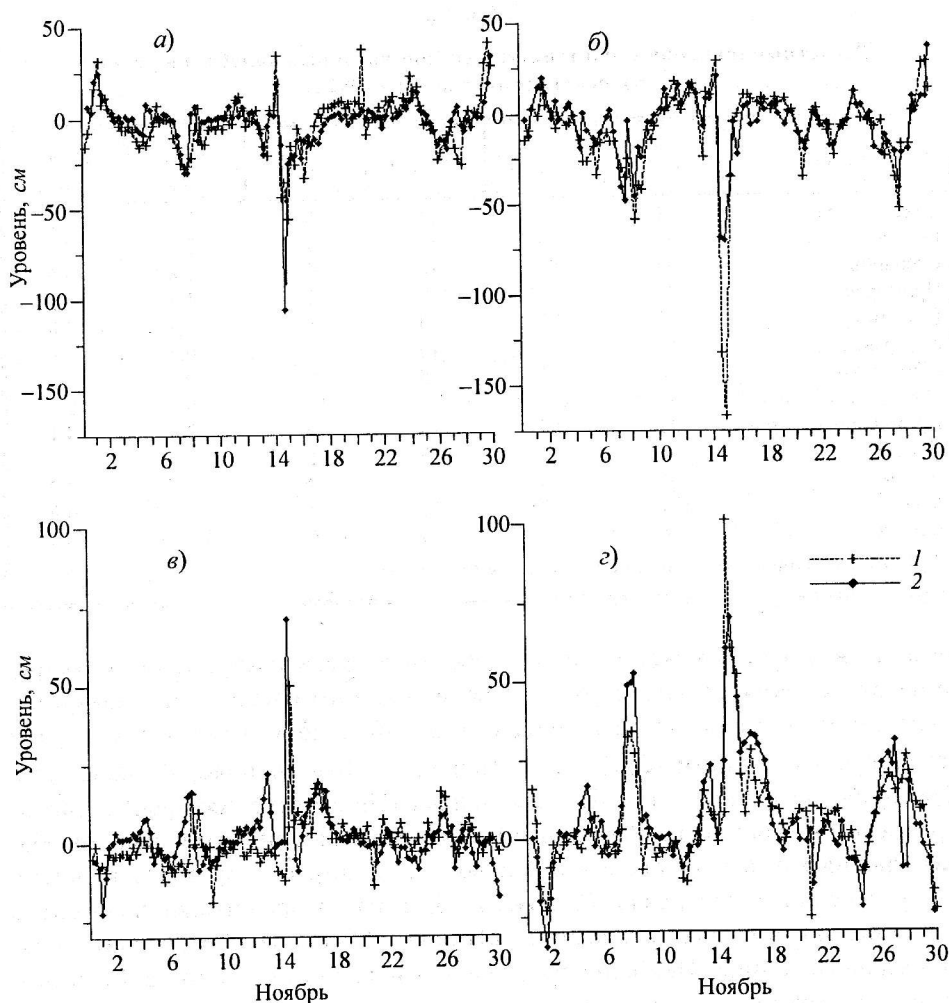


Рис. 3. Изменение уровня свободной поверхности моря в Мысовом (а), Геническе (б), Бердянске (в) и Мариуполе (г): 1 — фактическое; 2 — расчетное.

уровня. Здесь ζ_{ϕ} — фактический уровень; ζ_p — расчетный уровень; N — количество значений. Оправдываемость P_n оценивалась при допустимой ошибке 0,8 $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\zeta_{\phi} - \bar{\zeta})^2}{N-1}}$ [5], где $\bar{\zeta}$ — выборочное среднее значение уровня моря.

Следует отметить, что для районов вблизи Геническа и Мариуполя (рис. 3б, г) расчеты показали несколько заниженные значения максимальных отклонений уровня. Это может быть связано как с весьма условным совпадением местоположения пункта измерения и сопоставляемой ему точки на расчетной области, так и с точностью соответствия реальным условиям скорости и направления ветра в используемом массиве данных.

Таблица 3

Количественные оценки сравнения расчетных и фактических величин

Параметр	Мысовое	Геничск	Бердянск	Мариуполь
N	120	90	120	90
$ \Delta $, см	8	10	6	8
σ , см	12	16	10	11
P_n , %	81	76	75	84
R_n	0,66	0,85	0,40	0,79

Примечание. Описание параметров приведено в тексте.

Заклучение

На основе построенной гидродинамической конечно-элементной модели проведено исследование сгонно-нагонных явлений в Азовском море, обусловленных действием движущегося циклона. Дана характеристика эволюции отклонений уровенной поверхности и поля скорости течений в период реализации штормовой ситуации. Проведено сопоставление полученных результатов расчетов с имеющимися данными фактического изменения уровня, показавшее удовлетворительные значения оправдываемости расчетных величин и их корреляции с фактическими данными.

Литература

1. Букатов А. Е., Завьялов Д. Д., Соломаха Т. А. Численное моделирование динамики Азовского моря при сгонно-нагонных явлениях. — Метеорология и гидрология, 2006, № 6, с. 69—75.
2. Еремеев В. Н., Коновалов А. В., Манилюк Ю. В., Черкесов Л. В. Моделирование длинных волн в Азовском море, вызываемых прохождением циклонов. — Океанология, 2000, т. 40, № 5, с. 658—665.
3. Иванов В. А., Фомин В. В., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я. Исследование характеристик сгонно-нагонных явлений Азовского моря. — Морской гидрофизический журнал, 2008, № 1, с. 12—25.
4. Коннор Дж., Бреббиа К. Метод конечных элементов в механике жидкости. — Л., Судостроение, 1970, 269 с.
5. Руководство по морским гидрологическим прогнозам. — СПб, Гидрометеиздат, 1994, 525 с.
6. Фомин В. В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря. — Труды УНИГМИ, 2001, вып. 249, с. 246—255.
7. Blumberg A. F. and Mellor G. L. A description of three-dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coast Ocean Models. — Coast. Estuar. Sci., 1987, No. 4, pp. 1—16.
8. Mellor G. L. and Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem. — Rev. Geophys. Space Phys., 1982, No. 20, pp. 851—875.
9. Uppala S. M. et al. The ERA-40 reanalysis. — Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., vol. 131, pp. 2961—3012, doi: 10.1256/qj.04.176, 2005/.