

**РОЛЬ ВОДООБМЕНА,  
ОБУСЛОВЛЕННОГО НАЛИЧИЕМ  
КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА,  
НА ВОЛНЫ И ТЕЧЕНИЯ,  
ГЕНЕРИРУЕМЫЕ В АЗОВСКОМ  
МОРЕ ДВИЖУЩИМИСЯ  
ЦИКЛОНАМИ**

*В.А. Иванов, С.С. Нечаев,  
Л.В. Черкесов, Т.Я. Шульга*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
E-mail: otw@alpha.mhi.iuf.net

*С использованием трехмерной нелинейной сигма-координатной модели исследуется воздействие циклонических возмущений на динамику вод Азовского моря с учетом и без учета водообмена через Керченский пролив. Проведен анализ влияния размеров и направлений передвижения циклонических образований на сгонно-нагонные движения.*

**Введение.** Актуальность изучения сгонных и нагонных явлений в настоящее время обусловлена необходимостью учитывать их при строительстве береговых гидротехнических сооружений, прогнозе наводнений, экстремальных высот волн. Особенно важно решение этой проблемы в прибрежных областях морей, связанных мелкими проливами. Как следует из многолетних наблюдений [1], в Азовском море и на его побережье в зимний и весенний периоды отмечаются ураганы, активизированные циклонической деятельностью и вызывающие штормовые сгоны и нагоны, влияющие также на водообмен между Черным и Азовским морями. В работе [2] с использованием двумерной гидродинамической модели получено решение задачи о влиянии Азовского моря и Керченского пролива на колебания уровня в Черном море, вызванные прохождением циклонов. Исследованию особенностей динамики вод Азовского бассейна без учета Керченского пролива посвящена работа [3], где с помощью трехмерной нелинейной  $\sigma$ -координатной модели [4] изучено влияние параметров циклонических образований на сгонно-нагонные движения.

В данной работе принимаются нелинейные уравнения движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в при-

ближении теории мелкой воды [3, 4]. На свободной поверхности удовлетворяются кинематическое и динамические условия. На дне ( $z = -H(x, y)$ ) равна нулю нормальная составляющая скорости, придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью. На твердых боковых границах выполняются условия прилипания, на жидкой границе принимается условие свободного прохождения жидкости.

Расчетная область включает в себя Азовское море, Керченский пролив и примыкающую к нему часть Черного моря. Открытая зональная граница ( $\Gamma$ ), соответствует вертикальному разрезу бассейна Черного моря по  $44,81^\circ$  с.ш. Во всех точках, расположенных на этой границе ( $60 \leq x \leq 240$  км,  $y = 0$ ), выполняется условие  $v_n'|_{\Gamma} = 0$ , где  $\mathbf{n}$  – нормаль к жидкой границе. При решении задачи без учета пролива, рассматривается замкнутый бассейн, в котором вдоль  $39,33^\circ$  с.ш. ( $177 \leq x \leq 192$  км,  $y = 66$  км) имеет место вертикальная боковая стенка.

Считая радиус циклонического образования равным  $R_c$ , представим атмосферное давление  $p_a$  в виде:

$$p_a = \begin{cases} -p_0 \cos^2\left(\frac{\pi r}{2R_c}\right) + \tilde{p}_a, & r \leq R_c, \\ \tilde{p}_a, & r > R_c, \end{cases}$$

где  $\tilde{p}_a$  – фоновое значение давления;  $p_0$  – максимальное отклонение от  $\tilde{p}_a$  в атмосферном возмущении;  $r$  – расстояние от центра движущегося циклона  $(x_0(t), y_0(t))$  до точки с координатами  $(x, y)$ .

Согласно циклоне ветер рассчитываем, умножая модуль вектора геострофической скорости  $W_g$  на эмпирический коэффициент  $\mu = 0,7$ . Учитываем при этом, что направление ветра отклоняется от касательных к изобарам на угол  $\gamma = 20^\circ$  (угол втока) против часовой стрелки. Считая, что барическое образование движется поступательно со скоростью  $c$ , получаем выражение для скорости приводного ветра

$$\mathbf{W} = \begin{cases} \mu W_g \hat{T}(90^\circ + \gamma) \frac{\mathbf{r}}{r} + \mathbf{c}, & r \leq R_c, \\ 0, & r > R_c. \end{cases}$$

$$\text{Здесь } W_g = -\frac{fr}{2} + \left( \left( \frac{fr}{2} \right)^2 + \frac{(p_a)_r r}{\rho_a} \right)^{1/2} -$$

геоциклострофическая скорость;  $(p_a)_r$  – радиальный градиент атмосферного давления; вектор  $\mathbf{r}$  направлен от центра циклона к точке, в которой вычисляется  $\mathbf{W}$ ;  $T(\alpha)$  – матрица поворота на угол  $\alpha$ .

Над Азовским морем и его побережьем в течение года отмечаются штормовые циклоны, которые приводят к катастрофическим спадам и подъемам уровня. Наиболее часто они приходят из западных районов Черного моря и центральных районов Европы (западные циклоны), наблюдаются также средиземноморские циклоны и циклоны из Малой Азии (южные) [1].

На основании анализа материалов контактных и спутниковых наблюдений в районах Черного и Азовского морей [1] получены осредненные за 2 года характеристики циклонов. Средние скорости их поступательного перемещения составляют 5–10 м/с, средний диаметр области атмосферных образований 480–700 км, перепад давления между центром и периферией 11–21 гПа.

Для численного моделирования динамических процессов в Азовском море выбраны южные и западные циклоны, направления передвижения которых составляют с осью  $x$  углы  $90^\circ$  и  $0^\circ$  соответственно. Скорости их движения ( $\mathbf{c}$ ) принимаем равными 5 м/с, максимальные отклонения ( $p_0$ ) от фонового значения давления полагаем равными 15 гПа. Расчеты проведены для трех значений радиусов оснований барических образований 100, 200 и 400 км. Предполагается, что по мере перемещения центр циклона пересекает Азовское море по заданной траектории и проходит через его центральную часть.

Анализ результатов расчетов показывает, что максимумы скоростей приводного ветра ( $|\mathbf{W}|_{\max}$ ), вызываемых поступательными перемещениями атмосферных образований, движущихся с одинаковой скоростью, зависят от раз-

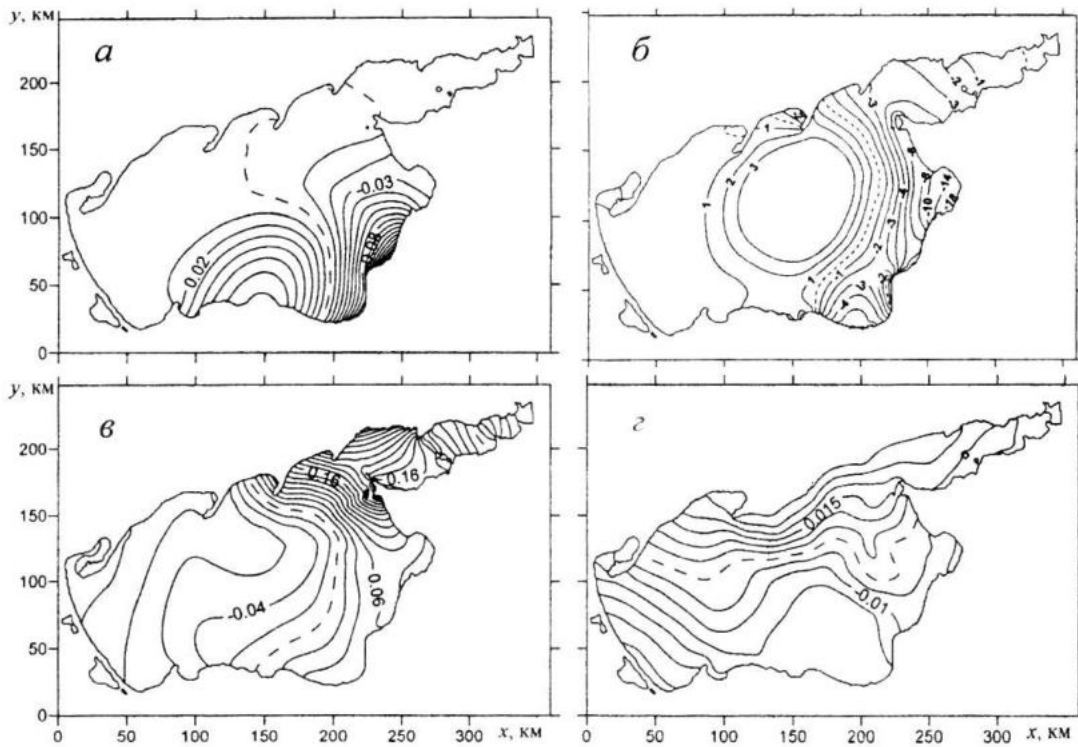
мера циклонов и составляют 21,34 м/с ( $R_c^1 = 100$  км), 19,5 м/с ( $R_c^2 = 200$  км), 16,5 м/с ( $R_c^3 = 400$  км). Время, в течение которого циклон движется по поверхности моря ( $t = t_k$ ), неодинаково, и оно зависит от величины радиуса основания:  $t_k = 25$  ч при  $R_c^1$ ,  $t_k = 36$  ч при  $R_c^2$ ,  $t_k = 58$  ч при  $R_c^3$ . Заметим, что расчетный период для всех циклонов составляет 168 ч (7 сут).

Следовательно, при прохождении циклонов в 2 и 4 раза больших размеров время нахождения их над акваторией увеличивается в 1,4 и 2,3 раза соответственно, при этом максимальная скорость ветра уменьшается на 8,6 и 22,7 %.

На рис. 1 представлены полученные в результате моделирования поля уровня Азовского моря, генерируемые прохождением южного циклона со скоростью 5 м/с и радиусом основания 100 км. Рис. 1, *a–в* даны в моменты времени  $t = 1, 8$  и  $24$  ч, соответствующие трем этапам перемещения атмосферного образования, рис. 1, *г* – через 12 ч после его ухода из акватории. Из анализа приведенных полей следует, что при  $t = 1$  ч (рис. 1, *a*) вдоль южного побережья происходит изменение уровня, симметричное относительно входа в пролив.

В это время ( $t = 1$  ч) у северо-восточного и северо-западного берега возмущений нет. Узловая линия (показана штриховой) пересекает центральную часть моря, она ориентирована по направлению перемещения циклона. Через 8 ч после начала действия циклона (рис. 1, *б*) изолинии уровня имеют эллиптическую форму и находятся в центральной области акватории. Узловая линия, разделяющая море на зоны сгона и нагона, смещена на восток и ориентирована по ходу циклона. Теперь в западной части имеет место повышение, а в восточной – понижение уровня.

С уходом циклона (рис. 1, *в*) изолинии уровня перестают быть замкнутыми, а узловая линия по-прежнему ориентирована по ходу движения циклона. В Таганрогском заливе отмечается сгущение изолиний уровня и его подъем, в восточной части – понижение. Из рис. 1, *г* видно, что узловая линия теперь ( $t = 36$  ч)



Р и с. 1. Поля уровня Азовского моря, генерируемые прохождением южного циклона со скоростью 5 м/с и радиусом основания 100 км, с учетом пролива в различные моменты времени: а – циклон входит в акваторию ( $t = 1$  ч); б – центр циклона пересекает центральный район моря ( $t = 8$  ч); в – циклон покинул акваторию ( $t = 24$  ч); г – спустя 12 ч после его ухода ( $t = 36$  ч)

ориентирована перпендикулярно к траектории перемещения циклона, южное побережье моря при этом становится зоной сгонов, северное – зоной нагонов.

В табл. 1 приведены максимальные значения нагонов и сгонов (см) и соответствующие им моменты времени ( $t_{extr}$ , ч).

Нагоны и сгоны вызываются южными циклонами, перемещающимися со скоростью 5 м/с, с радиусами оснований 100, 200 и 400 км. Рассматриваются случаи наличия и отсутствия пролива. Как следует из анализа данных в табл. 1, для различных параметров возмущающих циклонических образований и для всех рассматриваемых станций наибольшие по абсолютной величине отклонения уровня имеют место при условии учета водообмена через пролив. В верхней части табл. 1 приведены значения нагонов. Видно, что максимальные нагоны имеют место на ст. Таганрог.

Для рассматриваемых значений радиусов оснований циклонов, а также в зависимости от граничных условий в проливе на этой станции они составля-

ют: 49 см (1) и 54 см (2) при  $R_c^1$ ; 93 см (1) и 97 см (2) при  $R_c^2$ ; 102 см (1) и 115 см (2) при  $R_c^3$ . Относительная разница величин нагонов, рассчитанных с учетом и без учета пролива, не превышает 12 %.

Минимальные нагоны отмечаются на ст. Опасное: 5 см (1) и 7 см (2) при  $R_c^1$ ; 8 см (1) и 9 см (2) при  $R_c^2$ ; 10 см (1) и 12 см (2) при  $R_c^3$ . Время достижения наибольших подъемов уровня при учете пролива увеличивается не более чем на 7 %. При увеличении размера циклона в 4 раза время достижения максимумов нагонов увеличивается не более чем на 40 %.

В нижней части табл. 1 даны максимальные величины сгонов в тех же пунктах. Видно, что под действием циклонов различных размеров наибольшие сгоны имеют место на ст. Ейск: 45 см (1) и 48 см (2) при  $R_c^1$ ; 48 см (1) и 53 см (2) при  $R_c^2$ ; 39 см (1) и 44 см (2) при  $R_c^3$ . Изменения максимальных величин сгонов на этой станции с учетом и без учета

Таблица 1

Максимальные нагоны и сгоны ( $|\zeta|_{\max}$ , см), вызываемые южными циклонами, перемещающимися со скоростью 5 м/с, с радиусами 100, 200 и 400 км, и соответствующие им моменты времени ( $t_{\text{extr}}$ , ч) на береговых станциях Азовского моря, без учета (1) и с учетом (2) пролива

Береговые станции	$R_c^1 = 100$ км				$R_c^2 = 200$ км				$R_c^3 = 400$ км			
	1		2		1		2		1		2	
	$ \zeta _{\max}$	$t_{\text{extr}}$	$ \zeta _{\max}$	$t_{\text{extr}}$	$ \zeta _{\max}$	$t_{\text{extr}}$	$ \zeta _{\max}$	$t_{\text{extr}}$	$ \zeta _{\max}$	$t_{\text{extr}}$	$ \zeta _{\max}$	$t_{\text{extr}}$
Геническ	10	24,6	11	25,1	12	11,0	15	21,1	12	15,8	19	16,3
Бердянск	8	19,6	10	20,0	11	20,5	16	21,2	10	39,8	13	41,1
Мариуполь	39	17,7	46	17,8	59	26,3	68	28,5	70	44,5	79	46,2
Таганрог	49	22,6	54	23,6	93	29,4	97	31,4	102	45,3	115	46,7
Ейск	34	19,6	48	19,3	58	29,1	64	29,1	62	43,9	70	45,2
П.-Ахтарск	35	13,2	47	14,1	57	22,2	66	22,3	32	36,2	37	38,6
Темрюк	11	14,8	8	15,8	19	18,6	10	19,5	9	23,0	15	22,6
Опасное	5	4,8	7	5,1	8	13,6	9	14,7	10	19,0	12	19,2
Мысовое	6	29,0	10	29,7	8	14,0	12	14,3	18	17,1	19	17,7
Геническ	13	19,2	22	19,5	12	21,8	18	22,3	36	40,4	43	40,1
Бердянск	2	42,7	3	43,1	5	26,9	8	27,4	3	50,8	4	54,2
Мариуполь	12	30,3	7	31,4	15	15,3	11	15,5	22	20,5	17	21,3
Таганрог	19	33,3	21	33,8	27	20,1	47	20,7	60	44,6	63	45,7
Ейск	45	12,6	48	13,3	48	15,5	53	16,8	39	20,6	44	20,9
П.-Ахтарск	44	8,2	46	8,8	45	10,9	52	11,4	30	14,3	34	14,5
Темрюк	9	20,5	13	21,1	12	28,3	19	29,6	26	46,1	19	47,1
Опасное	8	19,7	12	20,6	12	27,4	16	27,2	27	43,2	22	44,2
Мысовое	10	17,6	15	18,4	10	23,0	17	23,6	31	40,1	33	41,9

водообмена через пролив для  $R_c^1$ ,  $R_c^2$  и  $R_c^3$  составляют 6, 15 и 11 % соответственно.

Минимальные сгоны отмечаются на ст. Бердянск: 2 см (1) и 3 см (2) при  $R_c^1$ ; 5 см (1) и 8 см (2) при  $R_c^2$ ; 3 см (1) и 4 см (2) при  $R_c^3$ . Как и для нагонов, с увеличением радиуса основания циклона уменьшается время достижения максимумов сгонов.

Результаты, приведенные в табл. 1, позволяют сделать вывод, что на рассматриваемых станциях при увеличении размеров оснований циклона в 2 раза рост максимумов сгонов и нагонов не превышает 2,3 раза. Увеличение размера основания циклона в 4 раза приводит к увеличению наибольших значений сгонов и нагонов не более чем в 3 раза. Учет водообмена через пролив приводит к изменению экстремальных отклонений уровня, не превышающего 40 %. Период времени, за который происходит формирование экстремальных значений уровня, уменьшается с увеличением размеров действующих циклонов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР*. Т. III Азовское море. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 218 с.
- 2 *Еремеев В.Н., Коновалов А.В., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В.* Моделирование длинных волн в Азовском море, вызываемых прохождением циклонов // *Океанология*. – 2000. 40, № 5. – С. 658 – 665.
- 3 *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование сгонно-нагонных явлений в Азовском море, вызванных атмосферными возмущениями // *Доповіді Національної Академії наук України*. – 2006. – № 11. – С. 109 – 113.
- 4 *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of three dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coast Ocean Models. *Coastal and Estuarine Science*, 4, 1987. – P. 1 – 16.