

Влияние Керченского пролива на сгонно-нагонные явления и течения в Азовском море, вызываемые циклоническими возмущениями

На основе численной трехмерной нелинейной σ -координатной модели исследуется воздействие циклонических возмущений на динамику вод Азовского моря с учетом и без учета водообмена через Керченский пролив. Показано, что учет водообмена через пролив вызывает увеличение до 40% экстремальных сгонов и нагонов. Проведен анализ влияния размеров и направлений передвижения циклонических образований на сгонно-нагонные явления. Установлено, что при увеличении размера основания южного циклона в 4 раза происходит возрастание максимумов сгонов и нагонов не более чем в 3 раза. Южные циклоны приводят к возникновению до 15% больших нагонов и сгонов во всех пунктах побережья по сравнению с западными циклонами.

Изучение сгонных и нагонных явлений в настоящее время актуально, т. к. их влияние необходимо учитывать при строительстве береговых гидротехнических сооружений, прогнозе наводнений, экстремальных высот волн и т. д. В исследованиях особое место занимает определение катастрофических подъемов и опусканий уровня. 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. Указанная выше математическая модель применена в [3] для анализа зависимости изменений уровня от траекторий перемещения циклона. В [4] даны оценки водообмена между Черным и Азовским морями через Керченский пролив под действием барических образований. Исследованию особенностей динамики вод Азовского бассейна без учета Керченского пролива посвящена работа [5], где с помощью трехмерной нелинейной σ -координатной модели [6, 7] изучено влияние параметров циклонических образований на сгонно-нагонные движения.

В данной работе с использованием трехмерной гидродинамической модели исследуется воздействие циклонических возмущений на динамику вод Азовского моря с учетом и без учета водообмена через Керченский пролив. Анализируется влияние размеров циклонических образований и Керченского пролива на сгонно-нагонные движения.

Постановка задачи. Граничные и начальные условия

Введем систему координат, в которой ось x направлена на восток, y – на север, z – вертикально вверх. Для расчета используем нелинейные уравнения движения однородной несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [6, 8]:

$$\frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{11}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{12}) + \frac{\partial}{\partial z} K_M \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{21}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{22}) + \frac{\partial}{\partial z} K_M \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + g\rho = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

Здесь все обозначения общепринятые.

Компоненты тензора турбулентных напряжений Рейнольдса τ_{ij} в (1), (2) имеют вид

$$\tau_{11} = 2A_M \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{12} = \tau_{21} = A_M \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad \tau_{22} = 2A_M \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (5)$$

при этом коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости A_M определяется в соответствии с работой [9].

Граничные условия на свободной поверхности следующие:

$$w|_{z=\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad (6)$$

$$K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=\zeta} = (\tau_{0x}, \tau_{0y}). \quad (7)$$

Здесь $\tau_{0x} = C_a W_x |\mathbf{W}|$ и $\tau_{0y} = C_a W_y |\mathbf{W}|$ – проекции касательных напряжений ветра; (W_x, W_y) – компоненты вектора скорости ветра \mathbf{W} на высоте 10 м над уровнем моря. Для численных расчетов коэффициент поверхностного трения выбран в форме, предложенной в [10]:

$$C_a = \begin{cases} 1,14 \cdot 10^{-3}, & |\mathbf{W}| \leq 10 \text{ м/с}, \\ (0,49 + 0,065|\mathbf{W}|) 10^{-3}, & |\mathbf{W}| > 10 \text{ м/с}. \end{cases} \quad (8)$$

На твердых боковых границах выполняется условие прилипания. При решении задачи с учетом пролива на жидкой границе принимается условие свободного протекания (равенство нулю первой производной нормальной

составляющей скорости к жидкой границе). На дне ($z = -H(x, y)$) равна нулю нормальная составляющая скорости

$$\left(w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) \Big|_{z=-H} = 0. \quad (9)$$

Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [8]

$$K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H} = (\tau_{1x}, \tau_{1y}), \quad (10)$$

где $\tau_{1x} = C_d u \sqrt{u^2 + v^2}$, $\tau_{1y} = C_d v \sqrt{u^2 + v^2}$, C_d – коэффициент донного трения, равный $k^2 \ln^{-2}(z_1/z_0)$, z_1 – шаг по вертикали в придонном слое, $z_0 = 0,003$ м – параметр шероховатости донной поверхности.

В начальный момент времени ($t = 0$) движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна, циклон находится за пределами акватории:

$$u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \quad \zeta(x, y, z, 0) = 0. \quad (11)$$

Считая радиус циклонического образования равным R_c , представим атмосферное давление p_a в виде [11]

$$p_a = \begin{cases} -p_0 \cos^2\left(\frac{\pi r}{2R_c}\right) + \tilde{p}_a, & r \leq R_c, \\ \tilde{p}_a, & r > R_c, \end{cases} \quad (12)$$

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 [11, 12], в неподвижном 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 \mathbf{c} , получим выражение для скорости приводного ветра

$$\mathbf{W} = \begin{cases} \mu W_g + T(90^\circ + \gamma) \frac{\mathbf{r}}{r} + \mathbf{c}, & r \leq R_c, \\ 0, & r > R_c, \end{cases} \quad (13)$$

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 α .

Для оценки влияния водообмена через Керченский пролив на каждом шаге по времени рассчитывается суммарный расход воды, проходящий через сечение, перпендикулярное оси y . При этом объем протекшей жидкости за время $0 \leq t \leq t_n$ определяется выражением

$$G(t_n) = S \sum_{i=1}^n \overline{U(t_i)} \Delta t_i, \quad (14)$$

где $\overline{U(t_i)}$ – средняя скорость течений на сечении пролива на i -м временном шаге (Δt_i); S – площадь сечения.

Численная реализация модели и выбор параметров. В исходных уравнениях (1) – (4), граничных (6), (7), (9), (10) и начальных (11) условиях осуществляется переход от координаты z к σ -координате [6, 8]:

$$x^* = x, \quad y^* = y, \quad \sigma = (z - \zeta)/(H + \zeta), \quad t^* = t, \quad \sigma \in [-1; 0]. \quad (15)$$

В численных экспериментах используются равномерные шаги по горизонтальным координатам ($\Delta x = \Delta y = 1$ км) и по σ -координате. Количество расчетных уровней по вертикали 11. Уравнения решаются с шагом по времени $\Delta t = 18$ с для определения осредненных двумерных компонент скорости и уровня моря и с шагом $10\Delta t$ – для вычисления отклонений от найденных средних горизонтальных скоростей и вертикальной компоненты скорости. Рельеф дна и конфигурация береговой линии Азовского моря в узлах сетки взяты из навигационных карт.

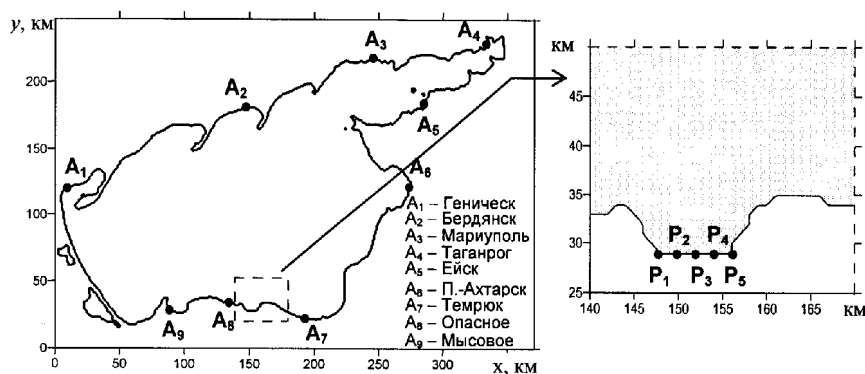
Анализ численных экспериментов

Над Азовским морем и его побережьем в течение года, но чаще всего зимой и весной 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, 13].

На основании анализа материалов контактных и спутниковых наблюдений в районах Черного и Азовского морей [13] 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° и 0° соответственно. Скорости их движения (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 ($R_c^i, i = 1, 2, 3$) $100, 200$ и 400 км. Предполагается, что по мере перемещения центр циклона пересекает Азовское море по заданной траектории и проходит через его центральную часть.

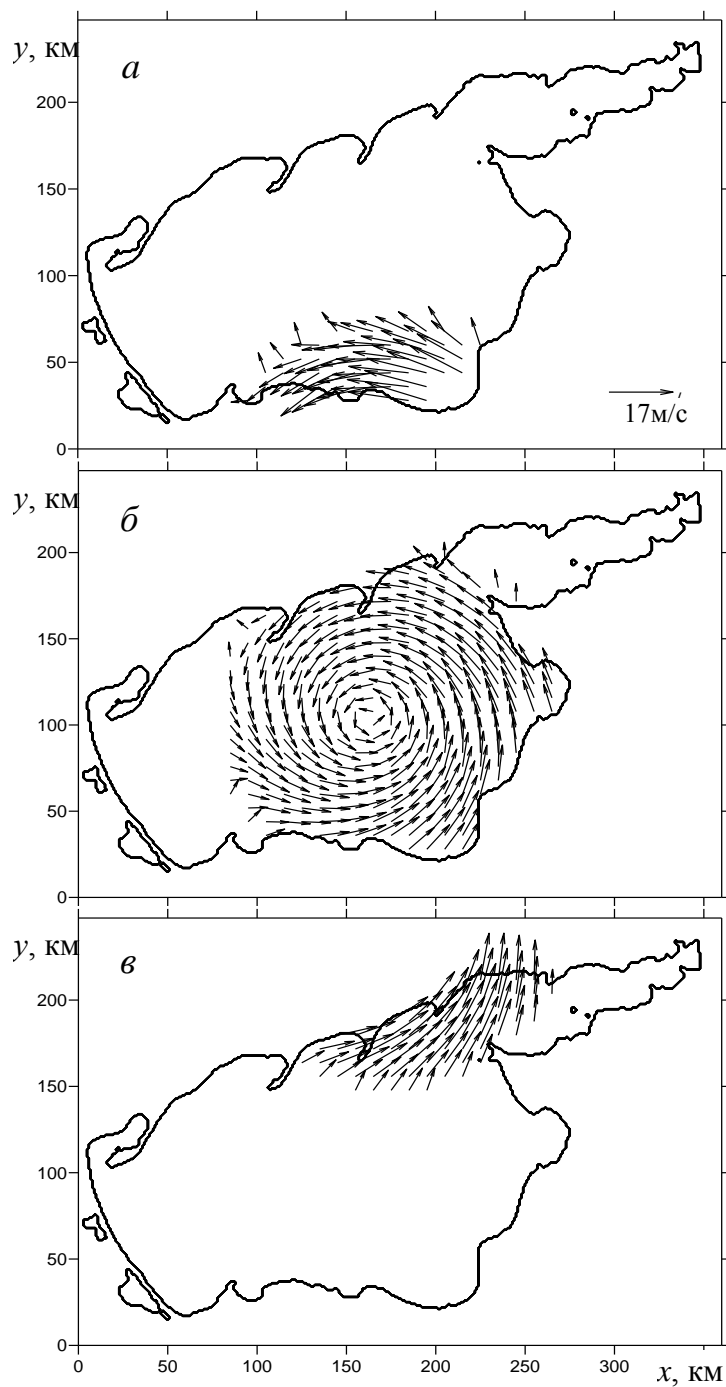
Расчетные значения сгонов и нагонов, возникающих под действием циклонов, отмечаются на береговых станциях Азовского моря $A_1 - A_9$, расположенных вблизи крупных населенных пунктов (рис. 1). Исследование осредненных по вертикали скоростей течений в проливе проводим в пяти пунктах ($P_1 - P_5$), равномерно расположенных на свободной поверхности (рис. 1). На основании реальной батиметрии средняя глубина сечения пролива составляет 4 м, ширина 10 км.



Р и с. 1. Положение береговых станций вдоль побережья Азовского моря и расчетных пунктов на границе пролива

1. Проанализируем результаты численных экспериментов, позволяющие сделать выводы о влиянии Керченского пролива на сгонно-нагонные движения в Азовском море, вызываемые прохождением южных циклонов с различными радиусами.

На рис. 2 представлены векторные поля ветра в приводном слое (на высоте 10 м), которые соответствуют трем этапам перемещения с юга на север со скоростью 5 м/с атмосферного образования радиусом основания 100 км. Первый этап начинается в момент времени $t = 1$ ч после вхождения циклона в акваторию (рис. 2, а); второй этап перемещения ($t = 8$ ч) отмечается при пересечении центром циклона центральной части моря (рис. 2, б); третий отвечает моменту времени $t = 24$ ч, когда циклон покидает поверхность Азовского моря (рис. 1, в).



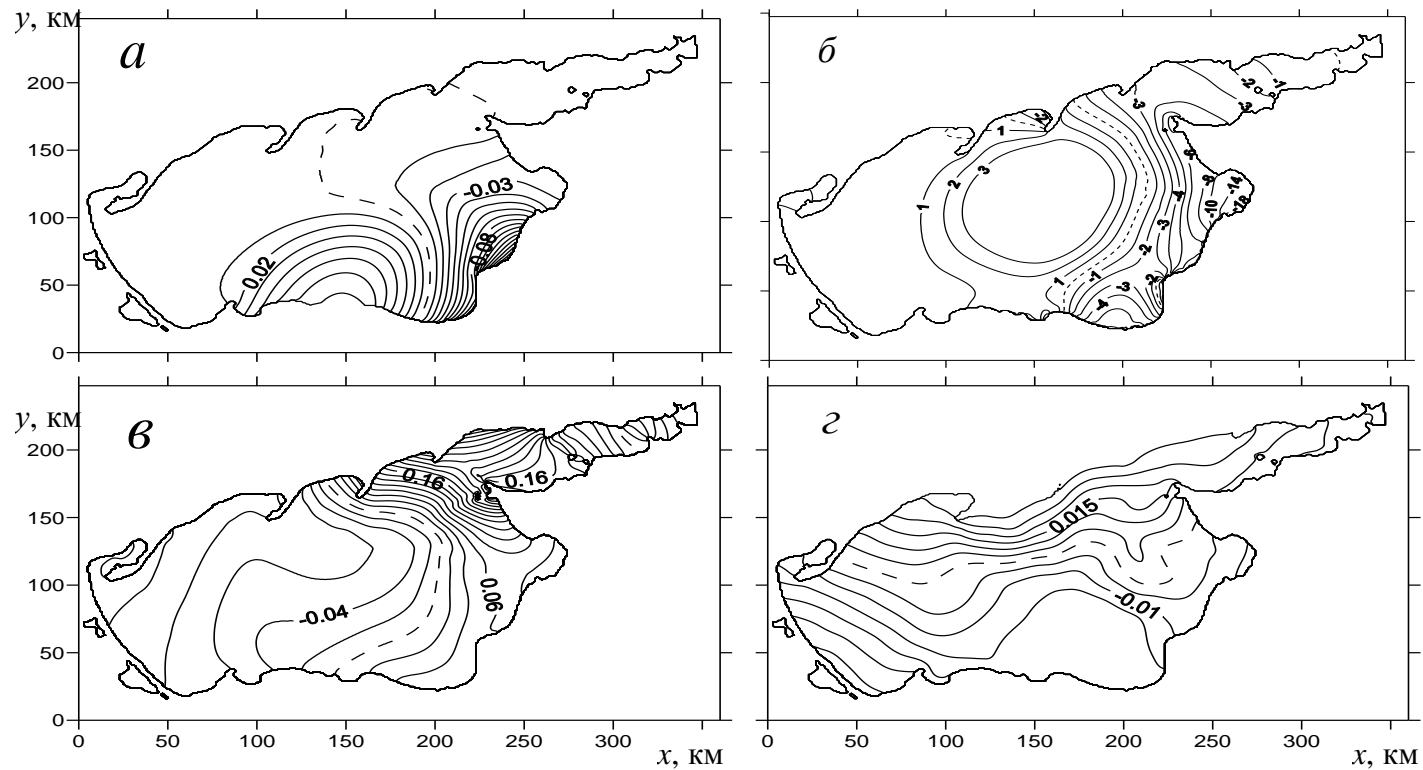
Р и с. 2. Поля скоростей приводного ветра при перемещении южного циклона со скоростью 5 м/с и радиусом основания 100 км в различные моменты времени: *a* – циклон вошел в акваторию ($t = 1$ ч); *б* – центр циклона пересекает центральный район моря ($t = 8$ ч); *в* – циклон уходит из акватории ($t = 20$ ч)

Анализ результатов расчетов показывает, что максимумы скоростей приводного ветра ($|\mathbf{W}|_{\max}$), вызываемого поступательными перемещениями атмосферных образований, движущихся с одинаковой скоростью, зависят от размера 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, 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. 3 представлены полученные в результате моделирования поля уровня Азовского моря, генерируемые прохождением южного циклона со скоростью 5 м/с и радиусом основания 100 км. Рис. 3, а – в даны в моменты времени $t = 1$, $t = 8$, $t = 24$ ч, соответствующие трем этапам перемещения атмосферного образования, рис. 3, б – через 12 ч после его ухода из акватории. Из анализа приведенных полей следует, что при $t = 1$ ч (рис. 3, а) 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. 3, 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. 3, 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. 3, г видно, что узловая линия теперь ($t = 36$ 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) на станциях $A_1 - A_9$. 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 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 составляют: 49 см ($U_n = 0$) и 54 см ($U'_n = 0$) при R_c^1 ; 93 см ($U_n = 0$) и 97 см ($U'_n = 0$) при R_c^2 ; 102 см ($U_n = 0$) и 115 см ($U'_n = 0$) при R_c^3 .



Р и с. 3. 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: *a* – 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)

Относительная разница величин нагонов, рассчитанных с учетом и без учета пролива, не превышает 12%. Минимальные нагоны отмечаются на ст. Опасное: 5 см ($U_n = 0$) и 7 см ($U'_n = 0$) при R_c^1 ; 8 см ($U_n = 0$) и 9 см ($U'_n = 0$) при R_c^2 ; 10 см ($U_n = 0$) и 12 см ($U'_n = 0$) 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%.

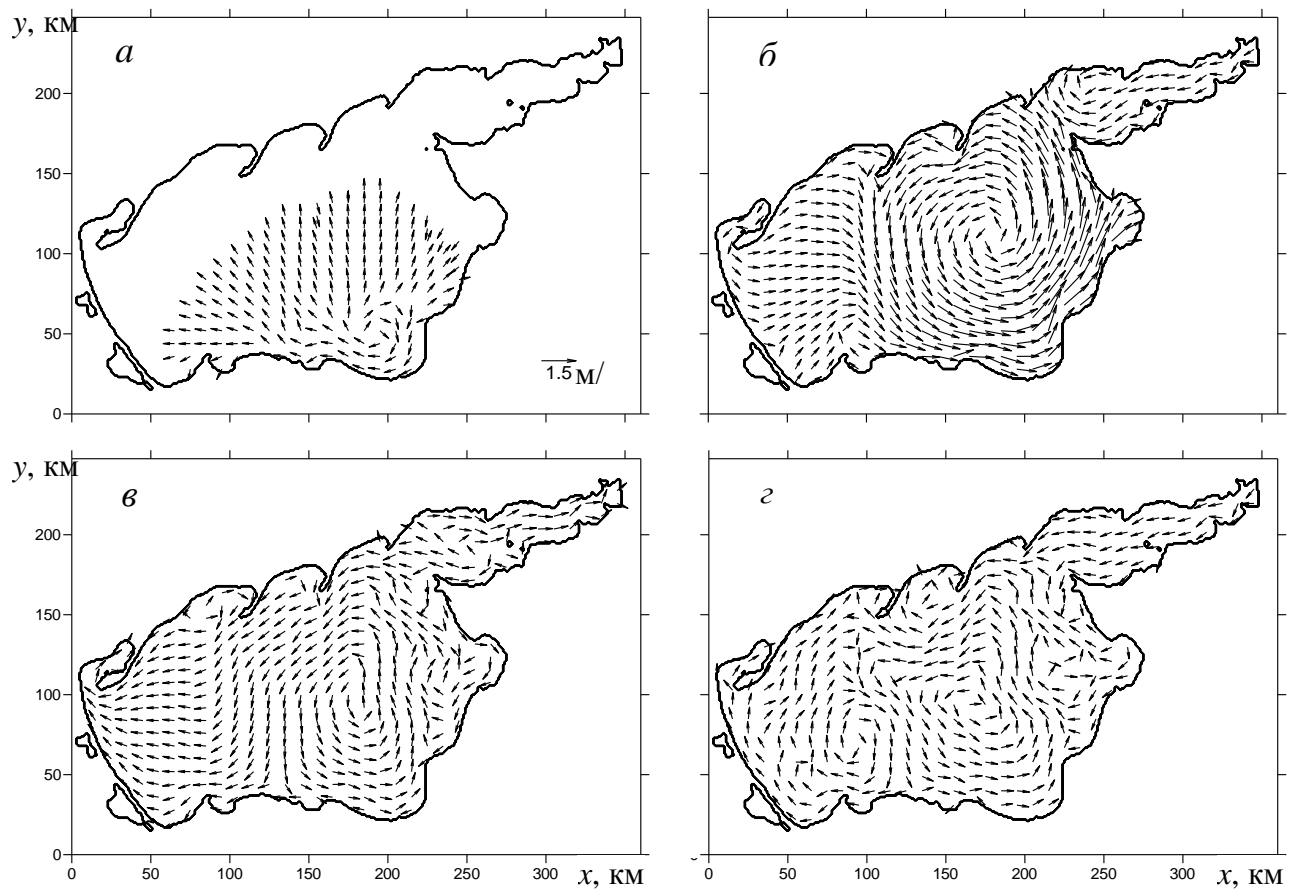
В нижней части табл. 1 даны максимальные величины сгонов в тех же пунктах. Видно, что под действием циклонов различных размеров наибольшие сгоны имеют место на ст. Ейск: 45 см ($U_n = 0$) и 48 см ($U'_n = 0$) при R_c^1 ; 48 см ($U_n = 0$) и 53 см ($U'_n = 0$) при R_c^2 ; 39 см ($U_n = 0$) и 44 см ($U'_n = 0$) при R_c^3 . Изменения максимальных величин сгонов на этой станции с учетом и без учета 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 ($U_n = 0$) и 3 см ($U'_n = 0$) при R_c^1 ; 5 см ($U_n = 0$) и 8 см ($U'_n = 0$) при R_c^2 ; 3 см ($U_n = 0$) и 4 см ($U'_n = 0$) 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 ($R_c^2 = 2R_c^1$) рост максимумов сгонов и нагонов не превышает 2,3 раза. Увеличение размера основания циклона в 4 раза ($R_c^3 = 4R_c^1$) приводит к увеличению наибольших значений сгонов и нагонов не более чем в 3 раза. Учет водообмена через пролив приводит к изменению не более чем на 40% экстремальных отклонений уровня. Период времени, за который происходит формирование экстремальных значений уровня, уменьшается с увеличением размеров действующих циклонов.

Проанализируем особенности пространственного распределения полей скоростей течений в поверхностном слое моря с учетом водообмена через пролив. В те же моменты времени t (1, 8, 24 и 36 ч) на рис. 4 приведены поля указанных скоростей течений, генерируемых действием южного циклона, движущегося со скоростью 5 м/с, с радиусом основания 100 км. В момент времени $t = 1$ ч (рис. 4, а) направление течений в значительной степени повторяет характер полей скорости приводного ветра (рис. 2, а). Структура и направление течений (рис. 4, б) спустя 8 ч изменяются. В центральной части бассейна имеет место антициклонический вихрь, в восточных и западных районах моря течения ориентированы перпендикулярно к траектории передвижения циклона. Через 24 ч (рис. 4, в), когда циклон уходит из акватории, в большей части моря и Таганрогском заливе преобладает западное направление течений, в центральной части сохраняется антициклоническая структура. Через 12 ч после ухода циклона из акватории поля течений становятся более разнородными (рис. 4, г). В западной и центральной частях моря отмечаются несколько вихревых образований, между которыми проходит полоса течений, направленных в сторону пролива, в восточной части течения ориентированы на запад.

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

Береговые станции	$R_c^1 = 100$ км				$R_c^2 = 200$ км				$R_c^3 = 400$ км			
	$U_n = 0$		$U_n' = 0$		$U_n = 0$		$U_n' = 0$		$U_n = 0$		$U_n' = 0$	
	$ \zeta _{\max}$	t_{extr}	$ \zeta _{\max}$	t_{extr}	$ \zeta _{\max}$	t_{extr}	$ \zeta _{\max}$	t_{extr}	$ \zeta _{\max}$	t_{extr}	$ \zeta _{\max}$	t_{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
Прим.-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
Прим.-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



Р и с. 4. Поля средних скоростей течений в Азовском море, генерируемых действием южного циклона со скоростью 5 м/с и радиусом 100 км, с учетом пролива: *a* – 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)

В табл. 2 приведены рассчитанные с учетом и без учета пролива макси-мумы скоростей течений, генерируемых южными циклонами, перемещающимися со скоростью 5 м/с, с радиусами оснований 100, 200 и 400 км. Эти значения представлены на различных глубинах моря. Из анализа приведенных данных следует, что под действием циклона радиусом 200 км при учете водообмена через пролив скорости течений на рассматриваемых горизонтах достигают наибольших значений: 1,34 м/с в поверхностном слое, 1,23 м/с на глубине 3 м, 1,16 м/с при $z = -5$ м, 0,82 м/с в придонном слое. Видно, что учет пролива и размеры действующих циклонов влияют на величины максимальных скоростей течений. При этом наибольшие значения относительных отклонений максимумов скорости течений для $U'_n = 0$ и $U_n = 0$ составляют 23 (R_c^1), 18 (R_c^2) и 8% (R_c^3).

Т а б л и ц а 2

Максимальные значения на различных глубинах моря скоростей течений (см/с), генерируемых перемещающимися со скоростью 5 м/с южными циклонами с радиусами 100, 200 и 400 км, с учетом и без учета пролива

Глубина, м	$R_c = 100$ км		$R_c = 200$ км		$R_c = 400$ км	
	$U_n = 0$	$U'_n = 0$	$U_n = 0$	$U'_n = 0$	$U_n = 0$	$U'_n = 0$
0	89	115	110	134	104	113
3	82	104	102	123	91	99
5	75	97	97	116	81	86
10	55	67	70	82	68	71

Рассмотрим теперь влияние Керченского пролива на интегральный водообмен ($G(t)$), вызываемый прохождением южных циклонов. В численных экспериментах на каждом шаге по времени рассчитаны значения функции $G(t)$. При этом положительные значения $G(t)$ свидетельствуют о поступлении воды в Азовское море, отрицательные – о том, что поток через пролив меняет направление на противоположное и происходит отток воды из бассейна.

Из анализа зависимости от времени интегральных расходов воды через пролив в течение расчетного периода (168 ч) следует, что наибольший расход воды происходит при циклоне самого большого размера ($53,6 \text{ м}^3$), наименьший – при циклоне с наименьшим основанием ($12,7 \text{ м}^3$). Нарастание расхода до максимума происходит от начального момента времени до момента, когда центр циклона пересекает центральную часть моря. После ухода циклона из акватории расход уменьшается до нуля и затем принимает отрицательные значения, вызванные оттоком воды.

В табл. 3 представлены максимальные значения в пунктах пролива средних по глубине скоростей течений, генерируемых южными циклонами, перемещающимися со скоростью 5 м/с, в зависимости от величины радиусов их оснований. Здесь же даны моменты времени их наступления. Из приведенных данных следует, что уменьшение размеров оснований циклонов приводит к увеличению максимальных скоростей течений в проливе. Отметим, что наибольшего значения максимумы скорости течений достигают в центре пролива (P_3): 0,33 (R_c^1), 0,29 (R_c^2), 0,21 м/с (R_c^3). Наименьшие максимальные скорости течений имеют место в пункте, расположенном у западной границы пролива (P_1): 0,23 (R_c^1), 0,19 (R_c^2), 0,14 м/с (R_c^3). Отсюда следует, что при одних и тех же размерах циклонов в центральной части пролива возникают течения, максимальные скорости которых в 1,5 раза превышают максимальные скорости течений на его границе. При увеличении размера основания циклона в 2 и 4 раза наибольшие значения скоростей течений во всех рассматриваемых пунктах пролива уменьшаются в 1,3 и 1,6 раза соответственно. Время достижения максимальных значений скорости при увеличении размеров циклонов в 4 раза увеличивается в 3 раза.

Т а б л и ц а 3

Максимальные значения средних скоростей течений ($|U|_{\max}$, см/с), генерируемых перемещающимися со скоростью 5 м/с южными циклонами при трех значениях их радиусов (R_c), и соответствующие им моменты времени (t_{\max} , ч)

Пункты в про- ливе	$R_c = 100$ км		$R_c = 200$ км		$R_c = 400$ км	
	$ U _{\max}$	t_{\max}	$ U _{\max}$	t_{\max}	$ U _{\max}$	t_{\max}
P_1	23	11,1	19	17,6	14	34,5
P_2	27	11,2	23	17,8	17	34,6
P_3	33	11,2	29	17,8	21	34,6
P_4	32	11,3	29	17,9	22	34,8
P_5	31	11,3	28	17,9	21	34,8

2. Во второй серии численных экспериментов оценим влияние на результаты расчетов изменения траектории передвижения циклонов с теми же основными параметрами, которые использовались выше. Моделирование штормовой ситуации [1, 13] проведем для циклонов, перемещающихся с запада на восток, с учетом и без учета водообмена через пролив.

В табл. 4 приведены максимальные нагоны и сгоны на береговых станциях Азовского моря, вызываемые действием западных и южных циклонов, перемещающихся со скоростью 5 м/с, для трех значений радиусов их оснований. Здесь же даны соответствующие моменты времени. Из анализа данных видно, что южные циклоны приводят к возникновению больших нагонов и сгонов во всех пунктах побережья. Максимальные отклонения величин уровня, вызываемые циклонами разных направлений, не превышают 40%. Время достижения максимумов подъемов и опусканий уровня моря под действием западных циклонов незначительно увеличивается (менее чем на 14%) по сравнению с действием южных циклонов.

Максимальные нагоны и сгоны ($|\zeta|_{\max}$, см), вызываемые действием перемещающихся со скоростью 5 м/с западных (З) и южных (Ю) циклонов при трех значениях их радиусов, и соответствующие им моменты времени (t_{extr} , ч)

Береговые станции	$R_c^1 = 100$ км				$R_c^2 = 200$ км				$R_c^3 = 400$ км			
	З		Ю		З		Ю		З		Ю	
	$ \zeta _{\max}$	t_{extr}	$ \zeta _{\max}$	t_{extr}	$ \zeta _{\max}$	t_{extr}	$ \zeta _{\max}$	t_{extr}	$ \zeta _{\max}$	t_{extr}	$ \zeta _{\max}$	t_{extr}
Геническ	9	25,7	11	25,1	12	21,8	15	21,1	17	17,1	19	16,3
Бердянск	8	20,6	10	20,0	14	22,2	16	21,2	12	41,6	13	41,1
Мариуполь	32	18,5	46	17,8	44	29,7	68	28,5	76	46,3	79	46,2
Таганрог	44	23,9	54	23,6	85	32,0	97	31,4	88	46,7	115	46,7
Ейск	47	20,0	48	19,3	44	29,8	64	29,1	46	45,4	70	45,2
Прим.-Ахтарск	42	14,2	47	14,1	45	22,9	66	22,3	29	38,7	37	38,6
Темрюк	5	17,0	8	15,8	7	19,7	10	19,5	14	22,8	15	22,6
Опасное	7	6,4	7	5,1	7	14,9	9	14,7	11	19,3	12	19,2
Мысовое	6	30,4	10	29,7	9	14,4	12	14,3	18	17,9	19	17,7
Геническ	17	20,3	22	19,5	16	22,5	18	22,3	37	40,3	43	40,1
Бердянск	3	43,2	3	43,1	6	28,5	8	27,4	3	54,5	4	54,2
Мариуполь	4	32,6	7	31,4	9	16,1	11	15,5	11	21,5	17	21,3
Таганрог	16	35,0	21	33,8	34	21,2	47	20,7	36	46,0	63	45,7
Ейск	30	14,1	48	13,3	34	17,0	53	16,8	37	20,9	44	20,9
Прим.-Ахтарск	31	8,8	46	8,8	34	12,1	52	11,4	29	14,9	34	14,5
Темрюк	8	21,6	13	21,1	14	30,1	19	29,6	14	47,5	19	47,1
Опасное	8	20,7	12	20,6	12	27,3	16	27,2	16	44,7	22	44,2
Мысовое	11	19,0	15	18,4	12	23,8	17	23,6	25	42,3	33	41,9

Как следует из анализа результатов моделирования штормовой ситуации, вызванной прохождением западных циклонов с учетом и без учета пролива, это направление передвижения атмосферных возмущений не дает заметного увеличения максимумов сгонов и нагонов по сравнению с действием южных циклонов.

Анализ результатов моделирования в Азовском море с учетом Керченского пролива штормовой ситуации, вызванной прохождением циклонов, приводит к следующим выводам:

- учет водообмена через пролив вызывает увеличение не более чем на 40% экстремальных сгонов и нагонов;
- при увеличении в 2 раза размера основания южного циклона происходит увеличение максимумов сгонов и нагонов не более чем в 2,3 раза; увеличение размера основания циклона в 4 раза приводит к увеличению наибольших значений сгонов и нагонов не более чем в 3 раза;
- время, в течение которого происходит формирование экстремальных значений уровня, уменьшается с увеличением размеров действующих атмосферных образований;
- в центральной части пролива максимальные скорости течений в 1,5 раза превышают скорости течений вблизи его боковых границ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. III. Азовское море.* – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 218 с.
2. *Коновалов А.В., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В.* Влияние Азовского моря и Керченского пролива на сгонно-нагонные колебания в Черном море // *Морской гидрофизический журнал.* – 2000. – №5. – С. 5 – 14.
3. *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.
4. *Иванов В.А., Коновалов А.В., Черкесов Л.В.* Влияние циклонов на изменение уровня поверхности Азовского и Черного морей // *Метеорология и гидрология.* – 2003. – №4. – С. 73 – 80.
5. *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.
6. *Фомин В.В., Черкесов Л.В.* Моделирование дрейфовых течений в мелководном бассейне с учетом изменения касательных напряжений, вызванных ветровыми волнами // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* – 2006. – 42, №3. – С. 362 – 370.
7. *Фомин В.В., Шульга Т.Я.* Исследование волн и течений, возникающих под действием ветра в Азовском море // *Доповіді Національної Академії наук України.* – 2006. – №12. – С. 110 – 115.
8. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of three dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coast Ocean Models // *Coast. Estuar. Sci.* – 1987. – 4, – P. 1 – 16.
9. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment // *Mon. Wea. Rev.* – 1963. – 91, – P. 99 – 164.
10. *Large W.G., Pond S.* Open ocean momentum fluxes in moderate to strong winds // *J. Phys. Oceanogr.* – 1981. – 11, № 3. – P. 324 – 326.

11. *Алексеев Д.В., Иванча Е.В., Иванов В.А. и др.* Моделирование эволюции волновых полей в районе северо-западного шельфа Черного моря при прохождении циклона // Морской гидрофизический журнал. – 2005. – №1. – С. 42 – 54.
12. *Григоркина Р.Г., Фукс В.Р.* Воздействие тайфунов на океан. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 244 с.
13. *Гришин Г.А., Баянкина Т.М., Калинин Е.И., Лундберг М.М.* Об эволюции южных циклонов, выходящих на Черное море и территорию Украины, по данным спутниковых и наземных наблюдений // Исследование земли из космоса. – 1991. – №3. – С. 89 – 95.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 20.05.08

ABSTRACT Based on the numerical three-dimensional non-linear σ -coordinate model, the influence of cyclonic disturbances on dynamics of the Sea of Azov waters is studied with and without allowance for the water exchange through the Kerch strait. It is shown that taking account of water exchange through the strait is followed by the increase of surge phenomena up to 40%. Influence of sizes and directions of movement of cyclonic formations upon the surge phenomena motions is analyzed. It is found that fourfold increase of size of the southern cyclone base results in the growth of maximum values of surge phenomena by not more than three times. Southern cyclones originate up to 15% of stronger surge phenomena in all the coastal points as compared to those induced by the western cyclones.