

Исследование характеристик сгонно-нагонных явлений Азовского моря

Представлены результаты численного моделирования течений и уровня в Азовском море. Для расчетов использована трехмерная нелинейная математическая модель, учитывающая касательные напряжения ветра. Приведены результаты расчетов полей течений и амплитуд колебаний уровня моря на прибрежных станциях в зависимости от максимальной скорости и периода постоянного действия западного ветра.

Введение

Сгонно-нагонные процессы и ветровые течения в Азовском море являются одним из основных факторов, влияющих на безопасность и эффективность эксплуатации морского транспорта и прибрежной инфраструктуры. Анализ влияния гидрометеорологических ситуаций на динамику вод в этом районе требует специальных комплексных исследований. Прогноз зависимости отклонения уровня на береговых станциях, вызываемого действием ветра, имеет важное прикладное значение при получении оценок экологических последствий в районах, расположенных на побережье Азовского моря.

Известен ряд работ, посвященных изучению течений и волнения в Азовском море при различных ветровых условиях. В работе [1] с использованием двумерных уравнений мелкой воды анализируется генерация длинноволновых возмущений, вызванных прохождением циклонов над Азовским морем. Моделирование ветрового волнения и циркуляции в этом районе для однородных по пространству и типовых распределений ветра проводится в [2, 3].

В настоящей работе исследуются сгонно-нагонные явления, вызываемые действием касательных напряжений ветра в Азовском море. Для расчета полей течений и уровня моря применяется нелинейная трехмерная σ -координатная модель [3, 4].

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 [4, 5]:

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

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

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

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

Здесь u, v, w – проекции скорости по осям x, y, z соответственно; t – время; $d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x + v\partial/\partial y + w\partial/\partial z$ – субстанциональная производная; p – давление; ρ – плотность; g – ускорение свободного падения; K_M – коэффициент вертикальной турбулентной вязкости; f – параметр Кориолиса.

Компоненты тензора турбулентных напряжений Рейнольдса τ_{ij} в (1), (2) определяются через составляющие скоростей по формулам:

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

где A_M – коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости, вычисляемый по формуле Смагоринского [6].

Граничные условия на свободной поверхности имеют вид:

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

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

При этом [7] $\tau_{0x} = C_a W_x |\mathbf{W}|$ 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 с модулем $|\mathbf{W}| = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$;

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

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 [4]

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

$$\tau_{1x} = C_d u \sqrt{u^2 + v^2}, \quad \tau_{1y} = C_d v \sqrt{u^2 + v^2}. \quad (11)$$

В (11) C_d – коэффициент донного трения [8], который находится по формуле $C_d = k^2 / (\ln^2 z_1 / z_0)$, где z_1 – шаг по вертикали в придонном слое; $z_0 = 0,03$ мм – параметр шероховатости, характеризующий гидродинамические свойства подстилающей донной поверхности; $k = 0,4$ – постоянная Кармана.

На боковых границах выполняются условия прилипания [5]. В начальный момент времени $t = 0$ движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна:

$$u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \quad w(x, y, z, 0) = 0, \quad \zeta(x, y, z, 0) = 0. \quad (12)$$

Численная реализация модели и выбор параметров

В исходных уравнениях (1) – (4), граничных условиях (6) – (11) и начальных условиях (12) осуществляется переход от координаты z к σ -координате [3, 4]:

$$x^* = x, \quad y^* = y, \quad \sigma = (z - \zeta) / (H + \zeta), \quad t^* = t, \quad \sigma \in [-1; 0]. \quad (13)$$

Поле горизонтальных скоростей представляется в виде суммы двух составляющих: средней по глубине компоненты и отклонения от нее. В результате этого уравнения движения расщепляются на две системы. Из первой определяются осредненные по глубине горизонтальные компоненты скорости течений и уровень моря, из второй – отклонения горизонтальных компонент скорости от соответствующих осредненных компонент и вертикальная скорость. Операторы переноса аппроксимируются с помощью TVD-схемы [3, 9], пространственная дискретизация уравнений выполняется на C -сетке. Используются равномерные шаги по горизонтальным координатам Δx , Δy и переменный шаг по σ -координате. Эволюционные уравнения интегрируются по времени с шагом Δt методом расщепления.

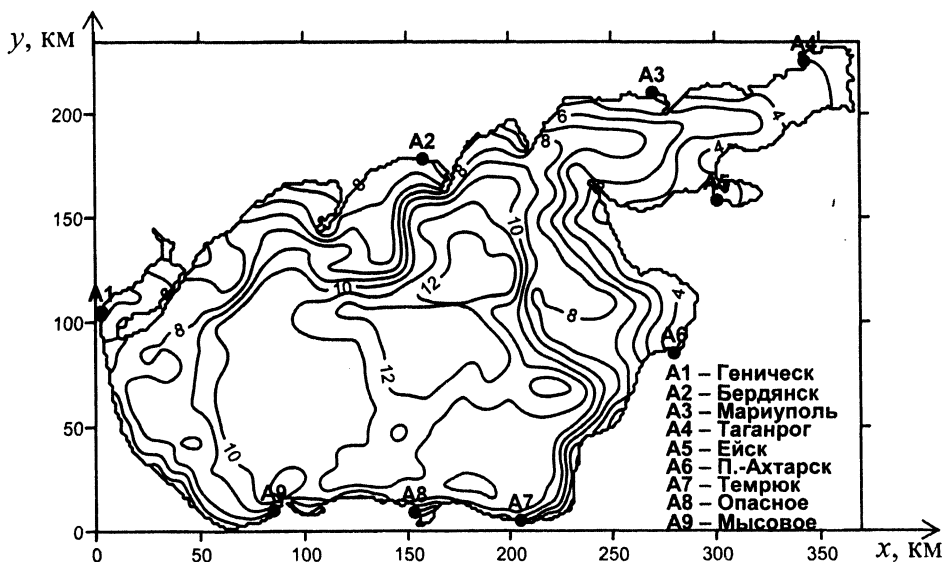


Рис. 1. Рельеф дна (м) Азовского моря и положение прибрежных станций

Модельный рельеф дна Азовского моря представлен на рис. 1. В узлах сетки он снимался с навигационной карты. Количество расчетных уровней σ_m по вертикали равно 11. Уравнения интегрировались с шагом $\Delta t = 18$ с для определения осредненных двумерных компонент скорости и уровня моря и $10\Delta t$ – для вычисления отклонений от найденных средних и вертикальной компоненты скорости. При параметризации вертикального турбулентного обмена применялась теория Меллора – Ямады [10].

Анализ численных экспериментов

При расчете полей пространственного распределения уровня моря и скорости течений использовались типовые поля ветра с параметрами, выбранными на основе анализа синоптических карт за 10 лет [11]. На периферии циклонов, проходящих над Западной Украиной, возникают переменные однородные по пространству штормовые ветры над акваторией моря, действующие с запада на восток. Как известно [11] (данные 18 тыс. экспедиционных наблюдений), продолжительность таких стабильных ветровых ситуаций в Азовском море в зависимости от сезона обычно составляет 12 – 28 ч.

Численные эксперименты проводились для западного ветра по следующему сценарию. В начальный момент времени $t = 0$ вода находится в состоянии покоя, уровень горизонтален, а скорость ветра нулевая. При $t > 0$ на водную поверхность начинает действовать ветер заданного типа, который усиливается со временем по линейному закону. Через 3 ч скорость ветра в каждой точке акватории достигает своего максимального значения и далее в течение периода T_j ($j = 1, 2, 3$) не меняется со временем. В следующие 3 ч она убывает до нуля и далее не меняется.

Западный ветер направлен вдоль оси x . Вдоль оси y его нет, поэтому составляющая скорости W_y равна 0. Изменение по времени составляющей скорости ветра W_x ($W_x = U$) задается следующим соотношением:

$$U_j(t) = \begin{cases} at, & 0 \leq t < t_1 \\ at_1, & t_1 \leq t < t_{2j} \\ at_1 - a(t - t_{2j}), & t_{2j} \leq t < t_{3j} \\ 0, & t_{3j} \leq t < t_{4j} \end{cases}, \quad (14)$$

где $at_1 = \max U$ – максимальная скорость ветра; $t_1 = 3$ ч; $t_{2j} = t_1 + T_j$; $t_{3j} = t_{2j} + t_1$; $t_{4j} = t_{3j} + 36$ ч; $j = \overline{1, 3}$.

Численные эксперименты проводятся для различных значений U_0 ($U_0 = \max U$), равных 5, 10, 15 м/с, и периодов постоянства максимума скорости ветра $T_1 = 6$ ч, $T_2 = 12$ ч, $T_3 = 18$ ч.

Отклонения свободной поверхности отмечаются на береговых станциях Азовского моря, расположенных по его периметру (рис. 1): A_1 – Геничеськ, A_2 – Бердянск, A_3 – Мариуполь, A_4 – Таганрог, A_5 – Ейск, A_6 – Приморско-Ахтарск, A_7 – Темрюк, A_8 – Опасное, A_9 – Мысовое.

1. В первой серии численных экспериментов оценим влияние максимума скорости западного ветра на сгоны и нагоны, формируемые на станциях побережья. Пусть период постоянного действия ветра 12 ч, а максимумы скорости 5, 10, 15 м/с. Результаты расчетов полей уровня моря для указанных скоростей приведены на рис. 2. Рисунки соответствуют моменту времени 15 ч, который состоит из времени нарастания скорости до максимума (3 ч) и периода постоянного действия ветра (12 ч). Как показывает анализ приведенных полей при различных максимумах скорости, понижения уровня, обусловленные западным ветром, возникают вдоль западного побережья (сгоны). У восточного берега происходит постепенное повышение уровня (нагоны). Узловая линия показана штриховой. Она пересекает центральную часть моря и ориентирована почти перпендикулярно направлению ветра. С увеличением максимального значения скорости ветра величина сгонов и нагонов возрастает на всем побережье Азовского моря.

Проанализируем особенности пространственного распределения полей скорости (рис. 3). Через 15 ч после начала действия ветра при различных значениях его максимальной скорости и одинаковом периоде общий характер течений, генерируемых ветром, одинаков. Видно, что при западном ветре вдоль северного берега моря формируются два круговорота одного знака. Южнее этих круговоротов – относительно широкая полоса переноса водных масс, ориентированная противоположно ветру.

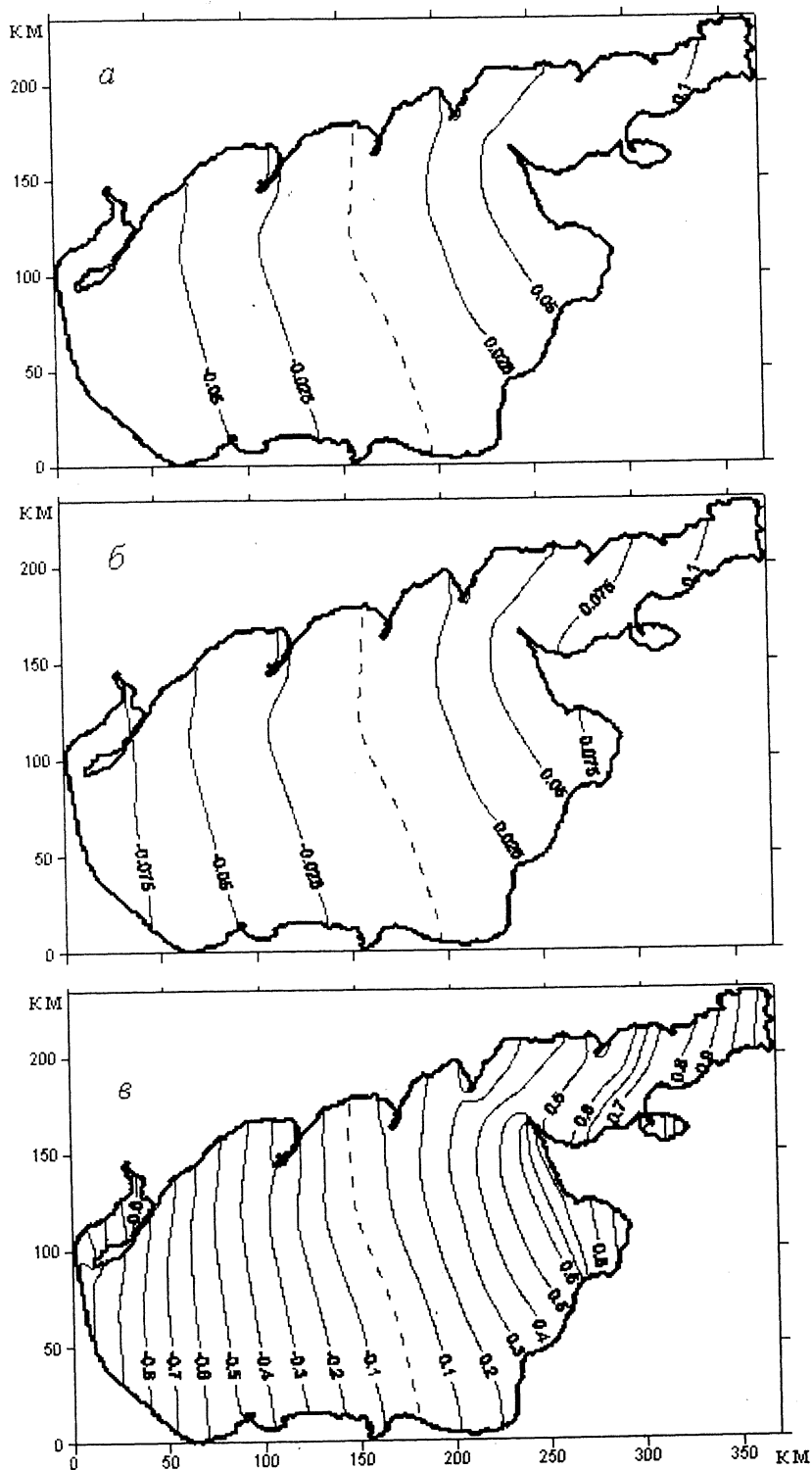
В табл. 1 приведены расчетные значения максимумов нагонов и сгонов и время их достижения ($t = t_0$) на береговых станциях Азовского моря для трех значений максимальной скорости ветра и периода его постоянного действия 12 ч. В верхней части даны значения нагонов, в нижней – сгонов.

Из анализа данных в верхней части табл. 1 следует, что ветер западного направления генерирует нагоны на станциях $A_1 - A_9$, величина которых зависит от его скорости. Наибольшие нагоны для ветра с максимальной скоростью 5, 10 и 15 м/с отмечаются на одной и той же станции A_4 (Таганрог) и составляют 0,17, 0,6 и 1,41 м соответственно. При увеличении скорости в 2 и 3 раза максимум нагонов возрастает в 3,5 и 8,3 раза.

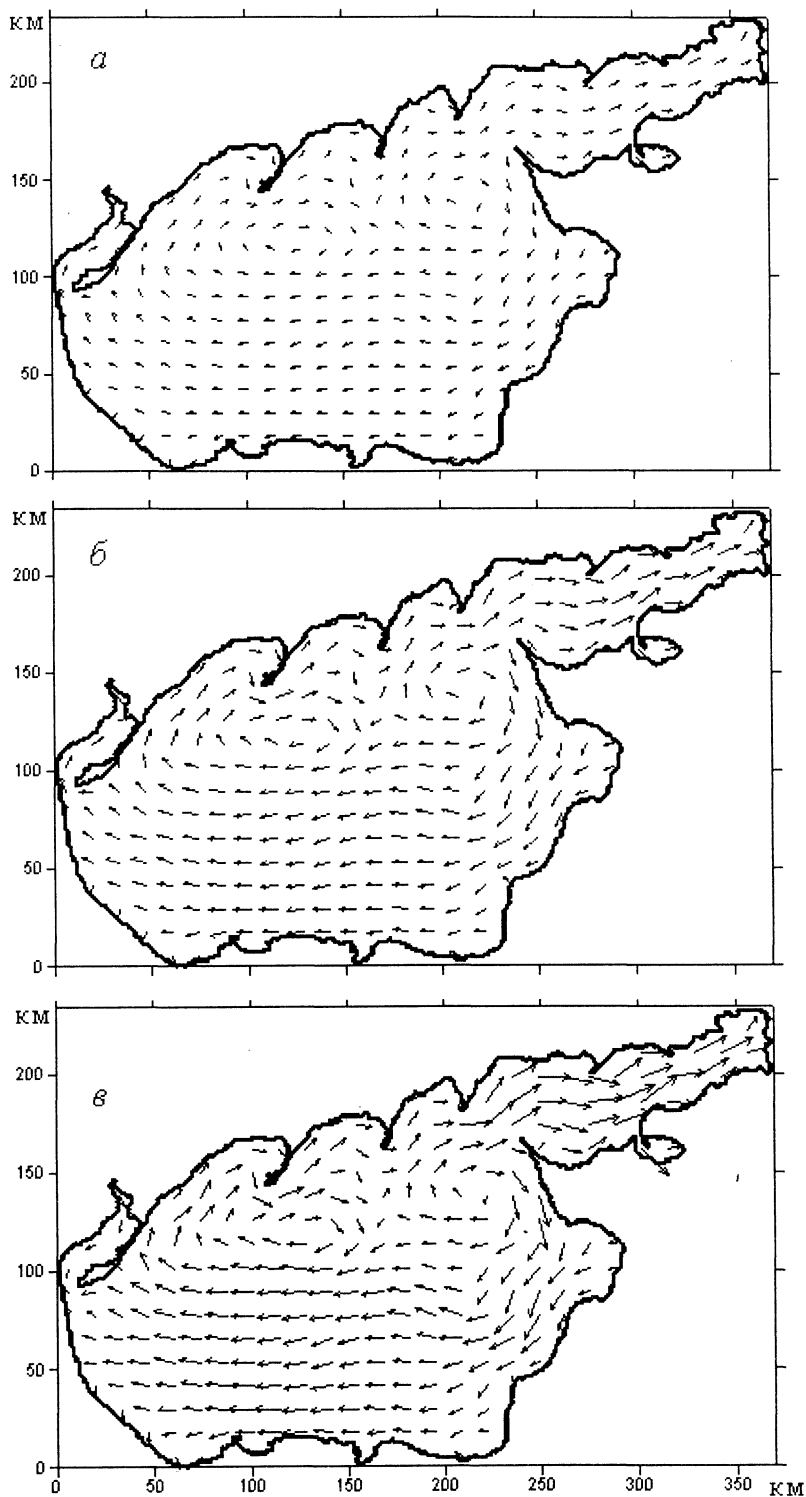
На станции A_4 максимальный нагон при $U_0 = 5$ м/с имеет место в 17,5 ч, при $U_0 = 10$ м/с – в 17,2 ч, при $U_0 = 15$ м/с – в 16,8 ч. Характерно, что появление экстремальных значений нагонов отмечается в близкие моменты времени, которые с увеличением скорости уменьшаются на 1 – 4%.

Наименьшие нагоны при указанных значениях скорости ветра имеют место на станции A_9 : 0,02 м ($t_0 = 26,7$ ч), 0,08 м ($t_0 = 26,8$ ч) и 0,17 м ($t_0 = 26,9$ ч). Отсюда следует, что с ростом скорости (в 2 и 3 раза) наименьшие значения нагонов увеличиваются в 4 и 8,5 раза, при этом время их достижения существенно не меняется (0,3%).

Из нижней части табл. 1 видно, что наибольшие сгоны формируются для всех рассматриваемых значений скорости ветра на станции A_1 и составляют для скоростей 5, 10 и 15 м/с 0,1 м ($t_0 = 12,9$ ч), 0,39 м ($t_0 = 13,2$ ч) и 1,04 м ($t_0 = 13,9$ ч), т.е. возрастают в 3,9 и 10 раз соответственно. Периоды времени достижения наибольших сгонов от $t = 0$ до $t = t_0$ становятся дольше для больших скоростей ветра в 2,3 и 7,5 раза.



Р и с. 2. Уровень Азовского моря (м) при западном ветре постоянного действия 12 ч с различными максимальными скоростями: а – 5 м/с, б – 10 м/с, в – 15 м/с



Р и с. 3. Поле скоростей течений в Азовском море, вызванных западным ветром постоянного действия 12 ч с различными максимальными скоростями: *а* – 5 м/с, *б* – 10 м/с, *в* – 15 м/с

Таблица 1

Максимальные значения нагонов и сгонов (м) и соответствующие им моменты времени (ч) для западного ветра в зависимости от его максимальной скорости

$\max U$, м/с	A_1 , t_0	A_2 , t_0	A_3 , t_0	A_4 , t_0	A_5 , t_0	A_6 , t_0	A_7 , t_0	A_8 , t_0	A_9 , t_0
5	0,03	0,02	0,08	0,17	0,11	0,09	0,05	0,03	0,02
	26,2	20,3	14,8	17,5	16,0	10,5	7,2	6,4	26,7
10	0,10	0,10	0,29	0,60	0,38	0,34	0,21	0,12	0,08
	26,4	20,4	15,1	17,2	16,2	10,6	7,3	6,5	26,8
15	0,22	0,26	0,70	1,41	0,91	0,91	0,56	0,32	0,17
	26,6	20,5	15,4	16,8	16,3	10,7	7,4	6,6	26,9
5	0,10	0,03	0,04	0,09	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05
	12,9	6,9	28,9	32,4	29,9	21,9	20,6	19,8	12,7
10	0,39	0,13	0,10	0,20	0,11	0,16	0,17	0,15	0,20
	13,2	7,0	29,1	33,7	30,4	22,3	20,8	20,0	12,8
15	1,04	0,36	0,13	0,25	0,12	0,40	0,45	0,41	0,52
	13,9	7,1	29,7	35,2	31,4	23,6	20,9	20,1	13,0

Наименьший сгон 0,04 м при максимальной скорости ветра 5 м/с формируется на станциях A_3 ($t_0 = 28,9$ ч), A_7 ($t_0 = 20,6$ ч) и A_8 ($t_0 = 19,8$ ч). При $U_0 = 10$ м/с минимальный сгон (0,1 м) имеет место в A_3 ($t_0 = 29,1$ ч), при $U_0 = 15$ м/с минимальный сгон (0,12 м) отмечается в A_5 ($t_0 = 31,4$ ч). Следовательно, величина наименьших сгонов увеличивается в 2,5 и 3 раза с ростом скорости ветра в 2 и 3 раза. Период времени достижения минимума сгонов увеличивается незначительно (до 8%).

Таким образом, ветер, действующий постоянно в течение 12 ч с большей максимальной скоростью, формирует большие нагоны и сгоны на всех береговых станциях. Период времени, за который происходит формирование экстремальных значений уровня, существенно не меняется с увеличением скорости ветра.

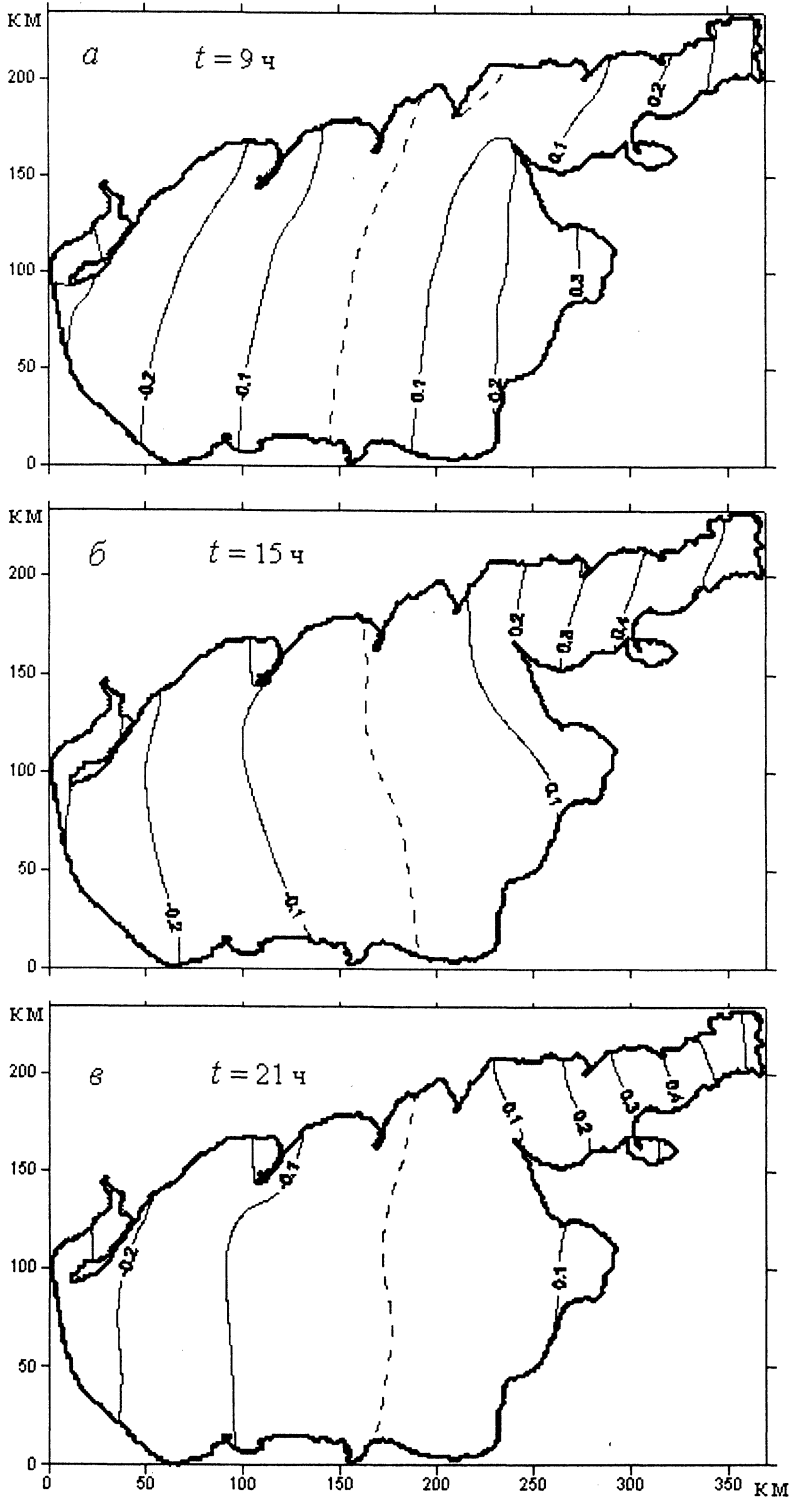
2. Вторым численным экспериментом проведем для ветра над Азовским морем, направленного с запада на восток с одинаковой максимальной скоростью при различных периодах постоянного действия. Пусть $U_0 = 10$ м/с, а периоды $T_{1,2,3} - 6, 12$ и 18 ч.

Поля уровня свободной поверхности с интервалом $0,1$ м приведены на рис. 4. Расчеты показывают, что при усилении ветра происходит постепенное повышение уровня у восточных берегов (нагон) и понижение – у западных (сгон). Вначале волны распространяются по направлению ветра (рис. 4, а). В Таганрогском заливе при западном ветре происходит наибольшее по всей акватории повышение уровня до $0,4$ м (рис. 4, б, в). Кривая нулевых амплитуд (показана на рисунках штриховой линией) пересекает центральную часть моря и ориентирована почти перпендикулярно направлению ветра.

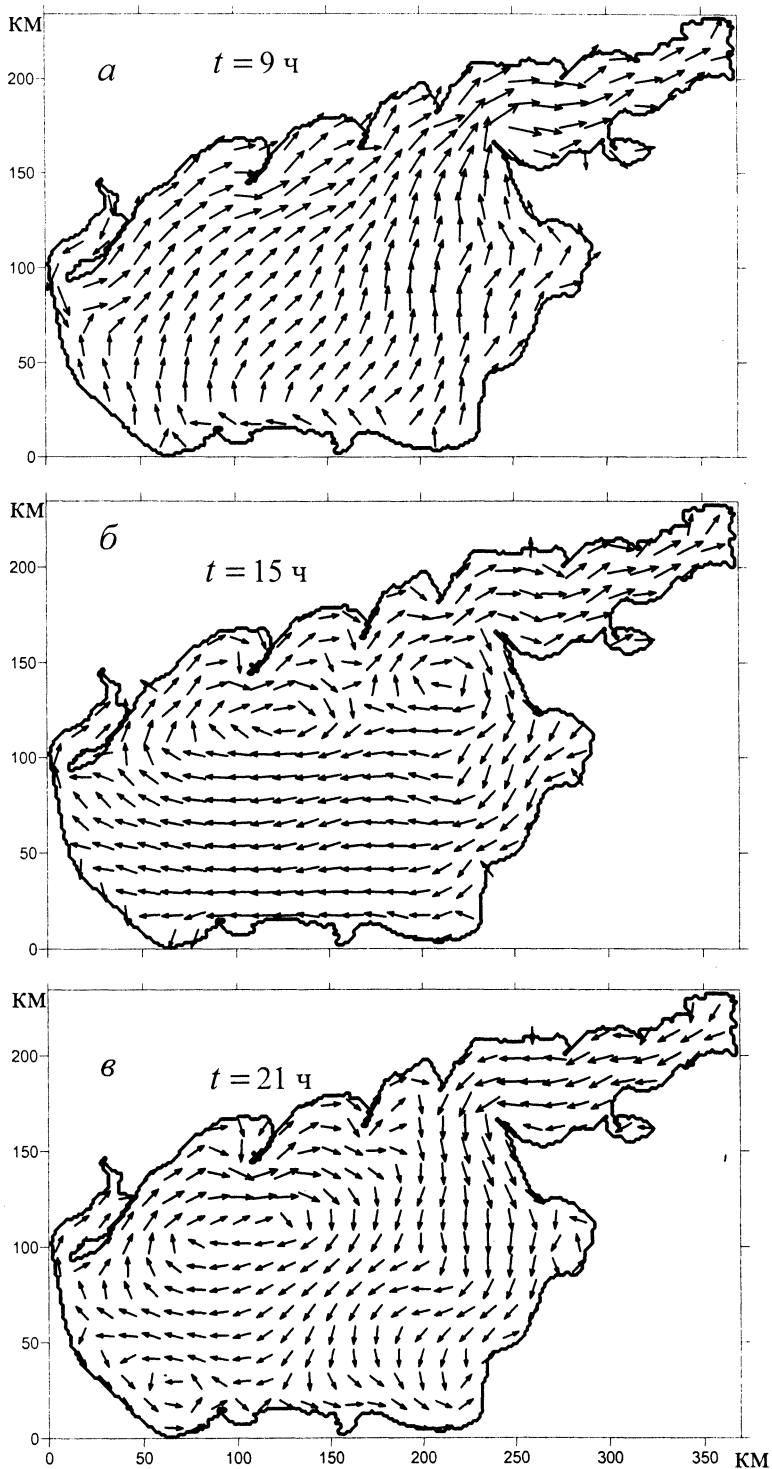
На рис. 5 представлены пространственные распределения величины и направления скорости течений, вызванных на поверхности моря западным ветром при максимальной скорости 10 м/с, в моменты времени $t = t_1 + T_j$ ($j = 1, 2, 3$). Видно (рис. 5, а), что через 9 ч после начала действия ветра небольшие отклонения от его направления имеют место в районах мысов и заливов. Спустя 15 ч (рис. 5, б) у северного побережья возникает пара вихрей одинакового знака. Вдоль противоположных границ моря течения направлены против ветра. Через 21 ч (рис. 5, в) циркуляция характеризуется наличием трех круговоротов: антициклонического (в северной части моря) и двух циклонических (у южного берега). Вдоль границ, разделяющих основные круговороты, формируются полосы, в которых течения направлены против ветра.

Максимальные значения нагонов и соответствующие им моменты времени в зависимости от периода постоянного действия ветра на станциях $A_1 - A_9$ приведены в верхней части табл. 2. Наибольшие нагоны для периодов $6, 12$ и 18 ч, отмеченные на одной и той же береговой станции A_4 , составляют $0,39$ м ($t_0 = 11$ ч), $0,6$ м ($t_0 = 17,2$ ч) и $0,62$ м ($t_0 = 18,7$ ч) соответственно. Следовательно, при увеличении периода в 2 раза ветер одной и той же скорости формирует нагоны, бóльшие в $1,5$ раза. При еще большем увеличении периода постоянного действия ветра (в 3 раза) максимум нагонов на станции A_4 мало изменяется. С увеличением $\tilde{T}_j = T_j/T_1$ ($j = 1, 2, 3$) в 2 и 3 раза становятся бóльшими периоды времени достижения наибольших нагонов, это изменение составляет $56, 70\%$ соответственно.

Наименьшие нагоны для рассматриваемых типов ветра формируются на одной и той же станции A_9 . Их значения составляют $0,1$ м ($t_0 = 20,9$ ч), $0,08$ м ($t_0 = 26,7$ ч) и $0,09$ м ($t_0 = 32,7$ ч) при периодах постоянного действия ветра $6, 12$ и 18 ч соответственно. Видно, что с ростом \tilde{T}_j в 2 раза минимальные нагоны становятся меньше на 20% , а увеличение \tilde{T}_j в 3 раза приводит к уменьшению нагонов только на 10% . Период времени, за который происходит формирование наименьших нагонов, тем больше, чем больше значение \tilde{T}_j (в $1,2$ и $1,6$ раза).



Р и с. 4. Уровень Азовского моря (м) при западном ветре максимальной скорости 10 м/с с различными периодами его постоянного действия: а – 6 ч, б – 12 ч, в – 18 ч



Р и с. 5. Поле скоростей течений в Азовском море, вызванных западным ветром максимальной скорости 10 м/с с различными периодами его постоянного действия: а – 6 ч, б – 12 ч, в – 18 ч

Максимальные значения нагонов и сгонов (м) и соответствующие им моменты времени (ч) для западного ветра в зависимости от периодов постоянного действия

$T_j, \text{ч}$	A_1, t_0	A_2, t_0	A_3, t_0	A_4, t_0	A_5, t_0	A_6, t_0	A_7, t_0	A_8, t_0	A_9, t_0
6	0,13	0,11	0,29	0,39	0,28	0,33	0,21	0,12	0,10
	21,0	14,6	14,8	11,0	15,0	9,6	7,2	6,5	20,9
12	0,10	0,10	0,29	0,60	0,38	0,34	0,21	0,12	0,08
	26,4	20,4	15,1	17,2	16,2	10,3	7,4	6,7	26,7
18	0,12	0,12	0,29	0,62	0,38	0,34	0,21	0,12	0,09
	32,9	26,7	15,1	18,7	16,3	10,5	7,5	6,8	32,7
6	0,31	0,13	0,09	0,21	0,10	0,19	0,20	0,18	0,24
	10,1	7,0	24,3	29,1	25,8	18,4	15,7	14,6	12,5
12	0,39	0,13	0,10	0,20	0,11	0,16	0,17	0,15	0,20
	13,2	7,1	29,1	33,7	30,4	22,3	20,8	20,0	12,8
18	0,41	0,13	0,11	0,19	0,11	0,16	0,17	0,15	0,19
	13,4	7,2	35,2	39,9	36,4	30,8	27,1	26,3	13,0

Анализируя данные, приведенные в нижней части табл. 2, отметим, что наибольшие сгоны имеют место в A_1 и составляют для различных $T_{1,2,3}$ (6, 12, 18 ч) 0,31, 0,39, 0,41 м в моменты времени 10,1, 13,2, 13,4 ч. Отсюда следует, что максимальные значения сгонов и время их достижения при $T_2=12$ ч и $T_3=18$ ч отличаются мало. При одинаковой максимальной скорости ветра увеличение периода его постоянного действия в 2 раза ($T_2=2T_1$) приводит к увеличению максимальных сгонов на 25%, а времени их достижения – на 30%.

Наименьшие сгоны отмечаются на станции A_3 : при $T_1=6$ ч – в 24,3 ч (0,09 м), при $T_2=12$ ч – в 29,1 ч (0,1 м), при $T_3=18$ ч – в 35,2 ч (0,11 м). Следовательно, минимальные сгоны с ростом \tilde{T}_j в 2 и 3 раза увеличиваются в 1,1 и 1,2 раза, а время их достижения – в 1,2 и 1,4 раза.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, позволяет сделать вывод, что увеличение периода действия постоянного ветра над акваторией моря в 2 раза ($T_2 = 2T_1$) приводит к увеличению сгонов и нагонов (от 1,1 до 1,6 раза) на всех станциях. Период времени, за который происходит формирование экстремальных значений уровня, увеличивается с увеличением периода постоянного действия ветра.

Выводы

Выполнено численное моделирование полей уровня и течений Азовского моря для характерных типов ветра, имеющих различные параметры. Анализ результатов позволил выявить следующие особенности динамики вод Азовского бассейна:

– наиболее сильному влиянию нагонных процессов подвержен Таганрогский залив в северо-восточной части Азовского моря. При западном ветре с различными значениями его максимальной скорости (5, 10, 15 м/с) нагон в заливе составляет 0,17 – 1,4 м. Минимальные нагоны (до 2 см) возникают при указанном типе ветра на ст. Мысовое, расположенной в юго-западной части моря. Характерной особенностью временного хода уровня на береговых станциях при постоянном действии ветра в течение 12 ч является появление его экстремальных значений через 15 ч после начала действия;

– наибольшие сгоны развиваются при западном ветре на ст. Геничск, расположенной в северо-западной части Азовского моря. С увеличением его максимальной скорости от 5 до 15 м/с сгоны увеличиваются от 0,1 до 1,04 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Фомин В.В., Иванов В.А. Численное моделирование ветрового волнения в районе острова Коса Тузла // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – Вып. 10. – С. 233 – 242.
3. Фомин В.В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря // *Научные труды УкрНИГМИ*. – 2002. – Вып. 249. – С. 246 – 255.
4. 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.
5. Черкесов Л.В., Иванов В.А., Хартиев С.М. Введение в гидродинамику и теорию волн. – С.-Пб.: Гидрометеиздат, 1992. – 264 с.
6. Smagorinsky J. General circulation experiments with primitive equations. I. The basic experiment // *Mon. Wea. Rev.* – 1963. – 91. – P. 99 – 164.
7. Large W.G., Pond S. Open ocean momentum fluxes in moderate to strong winds // *J. Phys. Oceanogr.* – 1981. – 11. – P. 324 – 326.
8. Кутайгородский С.А. Физика взаимодействия атмосферы и океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 284 с.

9. *Sweby P. K.* High resolution schemes using flux limiters for hyperbolic conservation laws / Soc. Indust. Appl. Math. // J. Numer. Anal. – 1984. – 21. – P. 995 – 1011.
10. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. – 1982. – 20. – P. 851 – 875.
11. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. III. Азовское море.* – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 218 с.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 06.07.06
После доработки 12.09.06

ABSTRACT Results of numerical modeling of currents and sea level in the Azov Sea are represented. The three-dimensional non-linear mathematical model taking into account the wind tangent tension is used for calculations. The results of calculations of the current fields and the amplitudes of the sea level fluctuations in the coastal points depending on maximum speed and duration of continuous effect of the western wind are given.