

# Математическое моделирование морских систем

УДК 532.59

В.А. Иванов, В.А. Наумова, В.В. Фомин, Л.В. Черкесов, Т.Я. Шульга

## Моделирование колебаний уровня Азовского моря, вызываемых ветром

С использованием прогностических полей приводного ветра и атмосферного давления на основе трехмерной нелинейной модели изучаются сгонно-нагонные явления Азовского моря. Поля приводного ветра и атмосферного давления получены по данным прогностической системы *Skiron*. Проведено сравнение численных расчетов с данными прямых измерений уровня моря на береговых станциях. Исследуется степень чувствительности расчетных величин сгонов и нагонов к величине коэффициента поверхностного трения.

Проблема экологической безопасности прибрежной зоны, которая имеет опасные техногенные объекты, является чрезвычайно актуальной для Украины. Своевременное предупреждение сгонно-нагонных явлений позволяет создать условия для нормального судоходства и избежать возможного ущерба загруженным прибрежным регионам. Однако имеющийся объем натуральных наблюдений не обеспечивает получение надежных эмпирических характеристик динамики вод при различных синоптических условиях. Одним из способов, позволяющих дать прогноз колебаний уровня моря, является численное моделирование.

Численному моделированию динамики вод Азовского моря посвящен цикл работ [1 – 4], где на основе линейных моделей изучены основные характеристики ветровых течений, сгонно-нагонных процессов для типовых стационарных полей ветра. Моделирование циркуляции под действием постоянного ветра на основе двумерных нелинейных моделей мелкой воды проводилось в [5, 6]. Для исследования волн и течений в Азовском море под действием нестационарного и однородного по пространству ветра в [7] использована трехмерная нелинейная модель [8].

В данной работе указанная выше математическая модель применена при изучении течений и колебаний уровня Азовского моря для переменных по пространству и времени полей приводного ветра и атмосферного давления, полученных по региональной прогностической модели *Skiron* (<http://forecast.uoa.gr>), использующей усвоение данных метеорологических наблюдений. Также проводится верификация модели по данным прямых измерений уровня на станциях Геническ и Мариуполь.

© В.А. Иванов, В.А. Наумова, В.В. Фомин, Л.В. Черкесов, Т.Я. Шульга, 2008

## 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 [8, 9]:

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

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

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

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

Здесь все обозначения общеприняты.

Компоненты тензора турбулентных напряжений Рейнольдса  $\tau_{ij}$  в (1), (2) определяются через градиенты осредненных скоростей по формулам

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

Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости  $A_M$  вычисляется с помощью формулы Смагоринского [10].

Граничные условия на свободной поверхности имеют вид

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

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

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 с модулем  $|\mathbf{W}| = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$ . Для численных расчетов выбрано три коэффициента поверхностного трения  $C_a^i$  ( $i = \overline{1, 3}$ ). Первый взят на основе известного соотношения [11], полученного в 1981 г.:

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

Из более поздней работы [12] для  $C_a^2$  используется формула

$$C_a^2 = k^2 [14,56 - 2 \ln W_0]^{-2}, \quad (9)$$

где  $k = 0,4$  – постоянная Кармана;  $W_0 = |W|/W_1$ ;  $W_1 = 1$  м/с. Третий коэффициент рассчитывается по наиболее современному представлению [13]:

$$C_a^3 = \begin{cases} 1,2 \cdot 10^{-3}, & |W| \leq 7,5 \text{ м/с}, \\ (0,8 + 0,065|W|)10^{-3}, & |W| > 7,5 \text{ м/с}. \end{cases} \quad (10)$$

На боковых границах выполняются условия прилипания и отсутствия потока в направлении внешней нормали. На дне ( $z = -H(x, y)$ ) равна нулю нормальная составляющая скорости

$$\left( w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) \Big|_{z=-H} = 0. \quad (11)$$

Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [9]

$$K_M \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H} = (\tau_{1x}, \tau_{1y}), \quad (12)$$

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 [8, 9], который находится по формуле  $c_d = \kappa^2 / (\ln^2 z_2 / z_0)$ , здесь  $z_2$  – шаг по вертикали в придонном слое,  $z_0 = 0,003$  м – параметр шероховатости, характеризующий гидродинамические свойства подстилающей донной поверхности.

В начальный момент времени  $t = 0$  движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна:

$$u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \quad w(x, y, z, 0) = 0, \quad \zeta(x, y, z, 0) = 0. \quad (13)$$

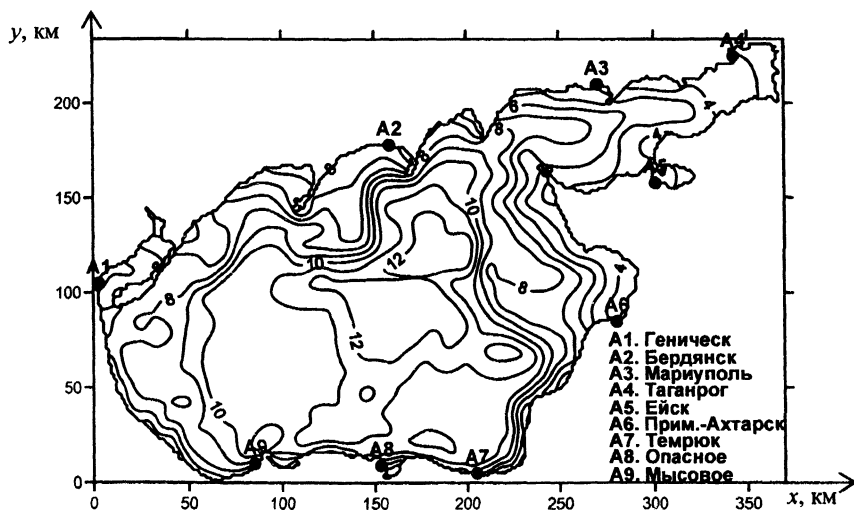
Численная реализация модели и выбор параметров. В исходных уравнениях (1) – (4), граничных условиях (6), (7), (11), (12) и начальных условиях (13) осуществляется переход от координаты  $z$  к  $\sigma$ -координате [8, 10]:

$$x^* = x, \quad y^* = y, \quad \sigma = (z - \zeta) / (H + \zeta), \quad t^* = t, \quad \sigma \in [-1; 0]. \quad (14)$$

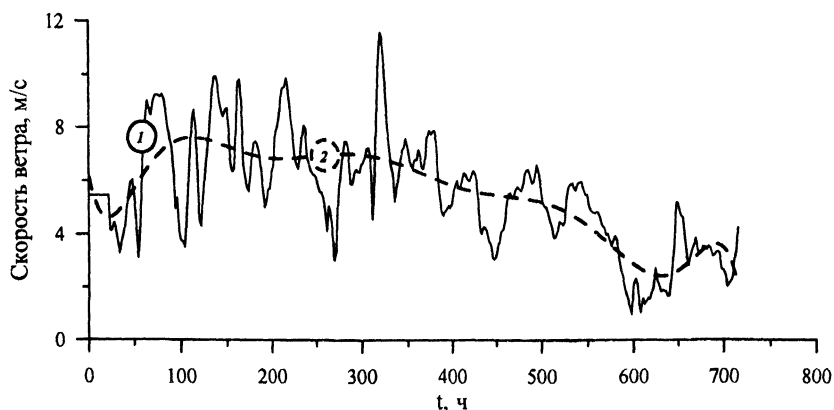
Используются равномерные шаги по горизонтальным координатам  $\Delta x = \Delta y = 1350$  м и по  $\sigma$ -координате. Количество расчетных уровней по вертикали равняется 11. Уравнения решаются с шагом  $\Delta t = 18$  с для определения осредненных двумерных компонент скорости и уровня моря, с  $10\Delta t$  – для вычисления отклонений от найденных средних и вертикальной компонент скорости. Эволюционные уравнения интегрируются по времени методом расщепления.

## Анализ численных экспериментов

Исходными данными являются рельеф дна и конфигурация береговой линии Азовского моря (рис. 1), которые в узлах сетки сняты с навигационной карты. В качестве входных метеорологических данных используются результаты численного моделирования полей приводного ветра и атмосферного давления, полученных с помощью региональной прогностической системы *Skiron* за ноябрь 2006 г. Эти данные были любезно предоставлены С.В. Станичным. Пространственное разрешение атмосферных полей 10 км, дискретность по времени 2 ч.



Р и с. 1. Рельеф дна (м) Азовского моря, положение прибрежных пунктов



Р и с. 2. Средняя скорость ветра над Азовским морем (1) и ее тренд (2) в течение расчетного периода

Проведем анализ ветрового режима над Азовским морем за расчетный период. На рис. 2 даны графики осредненной по акватории моря скорости прогностического ветра и ее тренд в течение 720 ч (30 сут). Средняя скорость

ветра в каждый момент времени рассчитывалась по формуле  $\overline{W} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |W_k|$ ,

где  $N$  – число узлов расчетной сетки,  $|W_k| = \sqrt{W_{xk}^2 + W_{yk}^2}$  – модуль скорости ветра в ее  $k$ -ом узле. Аппроксимация  $\overline{W}$  полиномом 9-й степени проводится по методу наименьших квадратов и дает тренд поведения скорости (рис. 2, штриховая линия). Из анализа кривой 2 видно, что за первые 6 сут происходит усиление ветра до 7 м/с, следующие 15 сут скорость монотонно уменьшается до 5 м/с, затем в течение следующих 5 сут отмечается ее резкое снижение до 1 м/с, после чего еще через 6 сут она уже не превышает 4 м/с (над морем штиль). Максимум средней скорости составляет 11,56 м/с и наблюдается 13 ноября, минимум – 0,98 м/с 25 ноября. В среднем в течение ноября скорость приводного ветра составляет 5,53 м/с.

Как следует из рис. 2 (линия 1), по средней скорости неоднородно. В течение коротких периодов 1 – 2 сут она то нарастает, то убывает, следовательно, меняется направление ветра. Таким образом, в ноябре над экваторией преобладал ветер западного и северо-западного направлений, но также было отмечено прохождение нескольких циклонов.

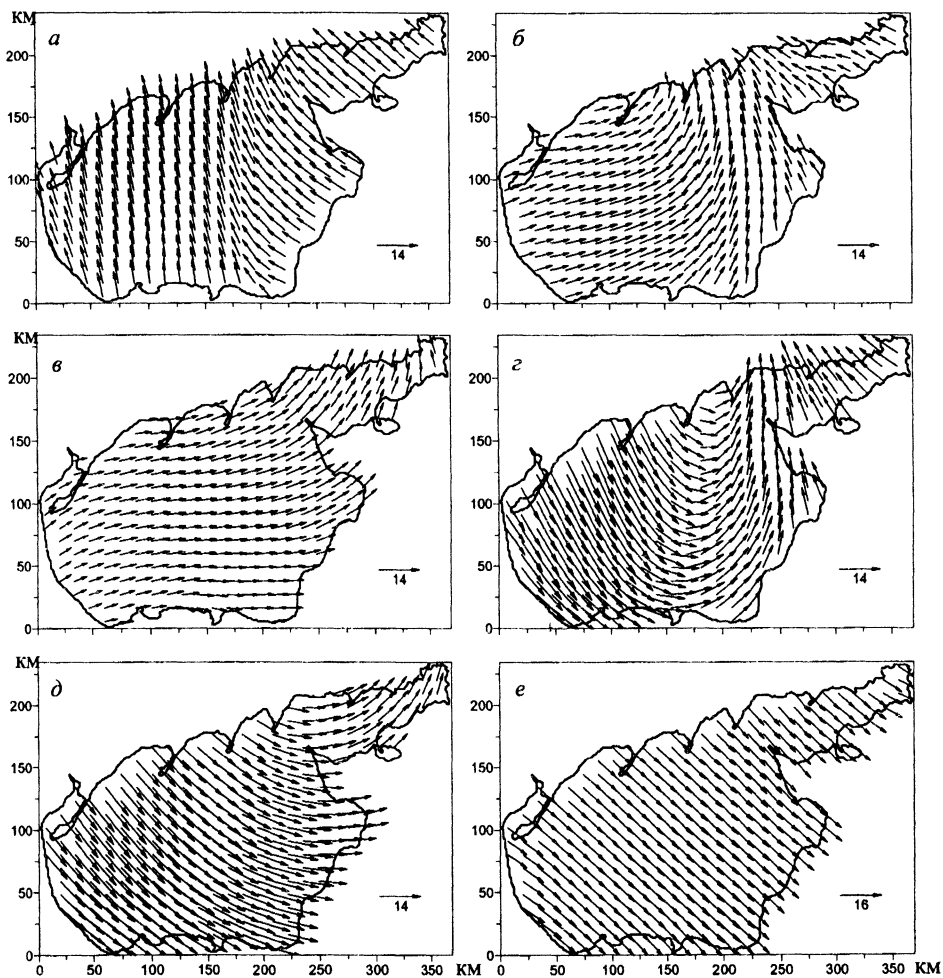
На рис. 3 представлены векторные поля ветра над Азовским морем, которые соответствуют экстремумам его скорости или резким переменам направления. Первая экстремальная ситуация отмечается 3 – 4 ноября (рис. 3, а), ветер меняет направление, и его скорость достигает на отдельных участках 14 м/с. На 8-е сутки над экваторией со штормовой скоростью движется небольшой циклон (рис. 3, б, в), который формирует экстремальные нагоны и сгоны на станциях. Следующий максимум скорости приходится на середину месяца, что соответствует обширному циклоническому образованию (рис. 3, г, д). На рис. 3, е показано направление поля ветра 13 ноября – последний экстремум скорости, в это время на ст. Геничеськ и Мариуполь имеют место максимальные сгоны. Далее до конца ноября над Азовским морем скорость ветра уменьшается и его направление практически не меняется.

В серии численных экспериментов оценим влияние коэффициента поверхностного трения на максимумы сгонов и нагонов, формируемые в пунктах побережья. Данный эксперимент проводится с целью изучения чувствительности решения к коэффициенту поверхностного трения. Значения сгонов и нагонов, возникающих под действием прогностического ветра, были рассчитаны для береговых станций Азовского моря, расположенных по его периметру (рис. 1).

Сравним варианты решений, полученных с использованием формул (8) – (10), по относительным изменениям экстремумов  $|\zeta|$  на ст.  $A_1 - A_9$ . Величину относительного отклонения решений ( $\delta$ ) будем находить по формуле 
$$\delta|\zeta| = 100\% \left| \frac{|\zeta|_{\text{наиб}} - |\zeta|_{\text{наим}}}{|\zeta|_{\text{наиб}}} \right|.$$

На рис. 4 представлены зависимости коэффициентов поверхностного трения от скорости ветра, рассчитанные по соотношениям (8) – (10). Видно, что при скорости ветра более 10 м/с между коэффициентами трения выполняется неравенство  $C_a^3 > C_a^2 > C_a^1$ , при малой скорости (до 4 м/с) –

$C_a^2 > C_a^1 > C_a^3$ , при средней (4 – 5,2 м/с) –  $C_a^{2'} > C_a^3 > C_a^1$ . В течение всего расчетного периода ( $0 \leq t \leq 720$  ч) по всей акватории Азовского моря наибольшее значение среди максимумов коэффициентов поверхностного трения принимает  $C_a^3$ , наименьшее –  $C_a^1$ . Наибольшее значение  $C_a^2$  находится между  $C_a^3$  и  $C_a^1$  ( $C_a^3 > C_a^2 > C_a^1$ ) и только в отдельные моменты времени оно становится больше, чем  $C_a^1$ .

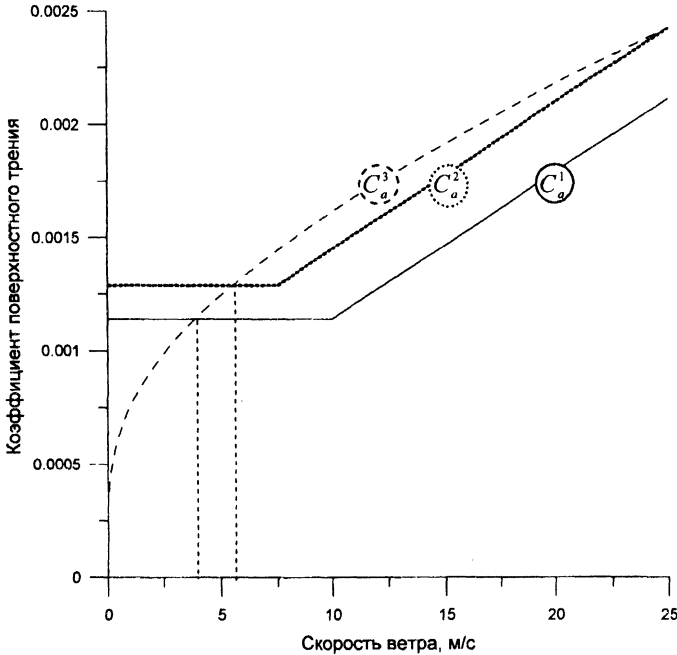


Р и с. 3. Направление полей приводного ветра в различные моменты времени: 96 ч (а), 168 ч (б), 190 ч (в), 240 ч (г), 252 ч (д), 314 ч (е)

В табл. 1 приведены максимальные значения нагонов и сгонов (см) на береговых станциях и отклонение результатов ( $\delta$ ) в зависимости от коэффициента поверхностного трения  $C_a^i$  ( $i = \overline{1, 3}$ ).

Из анализа данных, приведенных в верхней части табл. 1, следует, что максимальные нагоны имеют место на ст. Таганрог. Они составляют для ко-

ээффициента  $C_a^1$  0,75 м ( $t_{\text{extr}} = 331,7$  ч), для  $C_a^2 - 0,829$  м ( $t_{\text{extr}} = 331,4$  ч), для  $C_a^3 - 0,738$  м ( $t_{\text{extr}} = 331,9$  ч). Здесь  $t_{\text{extr}}$  – время достижения максимальных нагонов и сгонов в  $A_1 - A_9$ . Отклонение нагонов на этой станции максимально и равно 11%. Минимальные нагоны отмечаются на ст. Геничск: для  $C_a^1 - 0,171$  м ( $t_{\text{extr}} = 538,1$  ч), для  $C_a^2 - 0,192$  м ( $t_{\text{extr}} = 538,2$  ч), для  $C_a^3 - 0,192$  м ( $t_{\text{extr}} = 538,2$  ч). Наименьшее отклонение при расчете нагонов с разными коэффициентами поверхностного трения отмечается на ст. Бердянск и составляет 0,2%.



Р и с. 4. Зависимости коэффициентов поверхностного трения, вычисленных согласно [11 – 13], от скорости ветра

В нижней части табл. 1 даны максимальные величины сгонов на тех же станциях. Наибольшие сгоны для различных коэффициентов поверхностного трения  $C_a^i$  ( $i = \overline{1, 3}$ ) имеют место на ст. Геничск: при  $C_a^1 - 0,377$  м ( $t_{\text{extr}} = 324,6$  ч); при  $C_a^2 - 0,41$  м ( $t_{\text{extr}} = 326,4$  ч); при  $C_a^3 - 0,369$  м ( $t_{\text{extr}} = 324,5$  ч). Максимальное отклонение, полученное при расчете сгонов, равно 12,7% и наблюдается на ст. Ейск. Минимальные сгоны отмечаются на ст. Бердянск: при  $C_a^1 - 0,153$  м ( $t_{\text{extr}} = 163,2$  ч); при  $C_a^2 - 0,171$  м ( $t_{\text{extr}} = 162,9$  ч); при  $C_a^3 - 0,169$  м ( $t_{\text{extr}} = 163,1$  ч). Наименьшее отклонение при расчете сгонов также имеет место на ст. Бердянск и составляет 0,2%.

Максимальные нагоны и сгоны (см), соответствующие им моменты времени  $t_{\text{extr}}$  на береговых станциях и отклонение результатов ( $\delta$ ) в зависимости от коэффициента поверхностного трения  $C_a^i$  ( $i = \overline{1, 3}$ )

Береговые станции	$C_a^1$		$C_a^2$		$C_a^3$		$\delta, \%$
	$ \zeta _{\text{max}}$	$t_{\text{extr}}$	$ \zeta _{\text{max}}$	$t_{\text{extr}}$	$ \zeta _{\text{max}}$	$t_{\text{extr}}$	
Геническ	17,1	538,1	19,2	538,2	19,2	538,2	10,9
Бердянск	22,4	137,9	22,3	137,8	22,3	137,8	0,2
Мариуполь	38,8	142,1	43,8	219,1	39,3	142,1	10,2
Таганрог	75,0	331,7	82,9	331,4	73,8	331,9	11,0
Ейск	48,2	329,3	51,9	330,1	48,0	329,3	7,6
Приморско-Ахтарск	74,2	322,2	73,3	322,9	68,1	321,7	8,3
Темрюк	33,0	319,9	32,4	163,4	32,5	163,4	1,4
Опасное	22,0	163,8	22,2	163,6	22,3	163,6	1,5
Мысовое	13,6	161,5	14,0	161,3	14,1	161,3	3,5
Геническ	37,7	324,6	41,0	326,4	36,9	324,5	10,1
Бердянск	15,3	163,2	17,1	162,9	16,9	163,1	0,2
Мариуполь	15,5	417,8	17,4	417,8	17,5	417,8	11,4
Таганрог	24,9	420,2	27,7	500,0	27,7	500,1	10,1
Ейск	15,8	496,6	17,8	496,7	17,8	496,8	12,7
Приморско-Ахтарск	17,3	292,4	19,4	292,4	19,5	292,4	11,2
Темрюк	17,8	138,3	19,1	218,8	18,1	138,6	7,2
Опасное	17,9	219,4	20,1	219,4	18,6	219,4	11,0
Мысовое	27,0	326,0	28,9	326,2	25,8	325,7	10,7

Для ст.  $A_1, A_3 - A_5$  наибольшие нагоны рассчитаны с коэффициентом  $C_a^2$ , для  $A_2, A_6, A_7 - C_a^1$ , для  $A_8, A_9 - C_a^3$ . Наибольшие сгоны на ст.  $A_1, A_2, A_4, A_5, A_7 - A_9$  рассчитаны с коэффициентом  $C_a^2$ , на ст.  $A_3$  и  $A_6 - C_a^3$ . Следовательно, на большинстве станций максимальные сгоны и нагоны получены при расчетах коэффициента трения по формуле (9), минимальные – по формуле (8). Из анализа величины погрешности  $\delta$ , вычисленной по формулам (8) – (10), видно, что для нагонов она не превышает 11%, для сгонов – 12,7%.

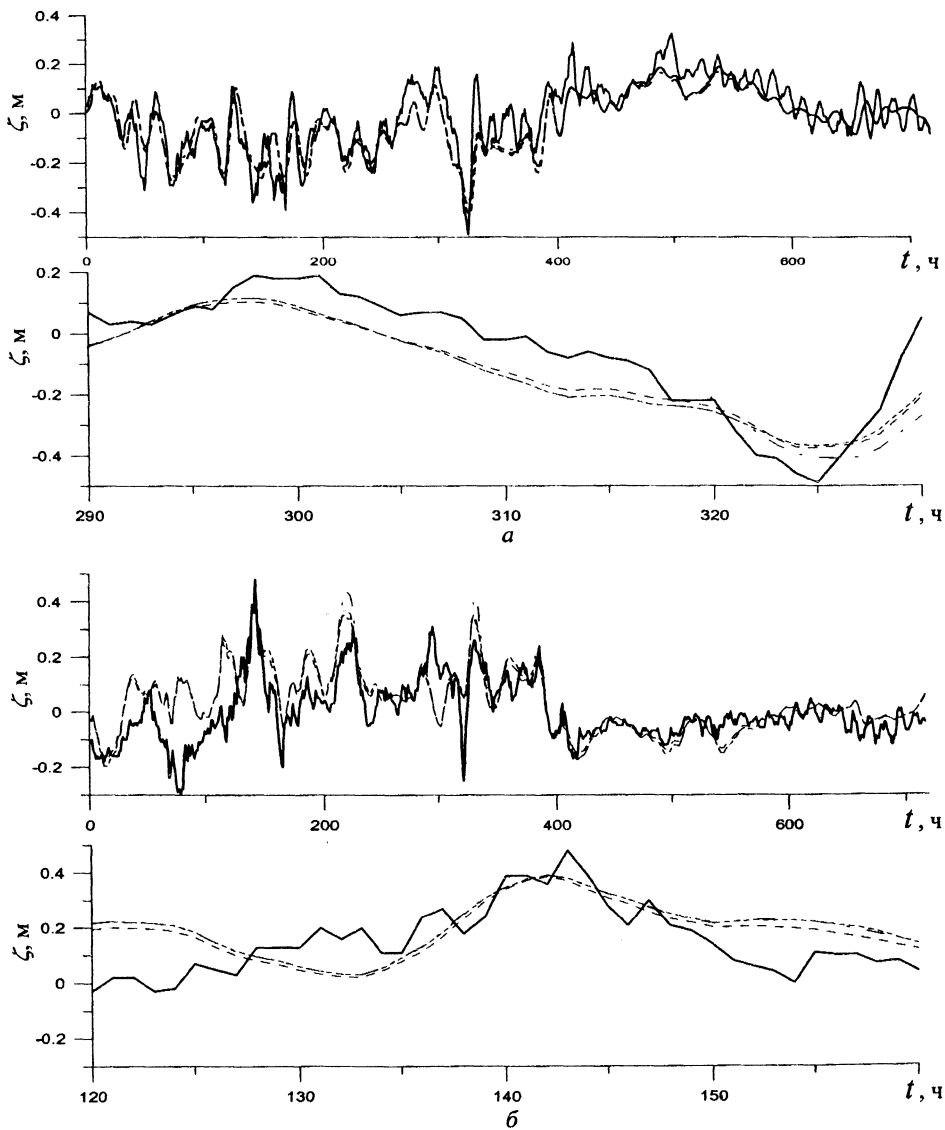
В этой же серии численных экспериментов проанализируем, как влияет изменение коэффициента поверхностного трения на время достижения экстремальных значений  $|\zeta|$ . Согласно табл. 1, нагоны на станциях Азовского моря, за исключением  $A_3$  и  $A_7$ , имеют место в моменты времени, отличающиеся не более чем на 12 ч. Для сгонов, за исключением ст.  $A_4$  и  $A_7$ , значения  $t = t_{\text{extr}}$  отличаются в пределах полусуток.



## Сравнение результатов моделирования и данных измерений на береговых станциях Азовского моря

Проведем анализ результатов моделирования и прямых измерений уровня моря. Сравнение проводилось по таблицам ежечасных высот уровня моря Государственной метеорологической службы Украины за ноябрь 2006 г.

Для верификации модели привлечены данные наблюдений в ноябре 2006 г. за уровнем на береговых гидрометеорологических станциях и постах Азовского моря. Эта информация представляет собой измерения уровня с помощью самописцев на ст. Геническ и Мариуполь, а также измерения с 6-часовой дискретностью по футштоку в других пунктах украинской части Азовского бассейна.



Р и с. 5. Изменения уровня моря в интервалах 800 ч и 40 ч: а – на ст. Геническ ( $290 \leq t \leq 330$  ч), б – на ст. Мариуполь ( $120 \leq t \leq 160$  ч). Сплошные линии – данные измерений, штриховые – модель

Графики зависимости уровня моря от времени по данным наблюдений за ноябрь 2006 г. и по модели показаны на рис. 5. Видно, что общие черты колебаний уровня для указанных станций в основном совпадают. На ст. Геническ (рис. 5, а) наибольшее экстремальное значение уровня – это сгон как по модели, так и по наблюдениям, который достигается в 325 ч. Отличие состоит в его величине: по измерениям она больше (0,49 м), чем по расчетам (0,41 м при  $C_a^2$ ). Максимальный нагон на этой станции наблюдается в 501 ч: по измерениям он составляет 0,33 м, по расчетам 0,22 м при  $C_a^2$  и  $C_a^3$ .

На ст. Мариуполь наибольший наблюдаемый и расчетный подъем уровня имеет место в 143 ч (рис. 5, б). Здесь величина нагона по модели (43,8 см при  $C_a^2$ ) меньше, чем по данным наблюдений (44 см), на 0,2 см (или 9%). Наибольший сгон по измерениям (0,30 м) также превышает модельный (0,18 м при  $C_a^2$  и  $C_a^3$ ) на 12 см.

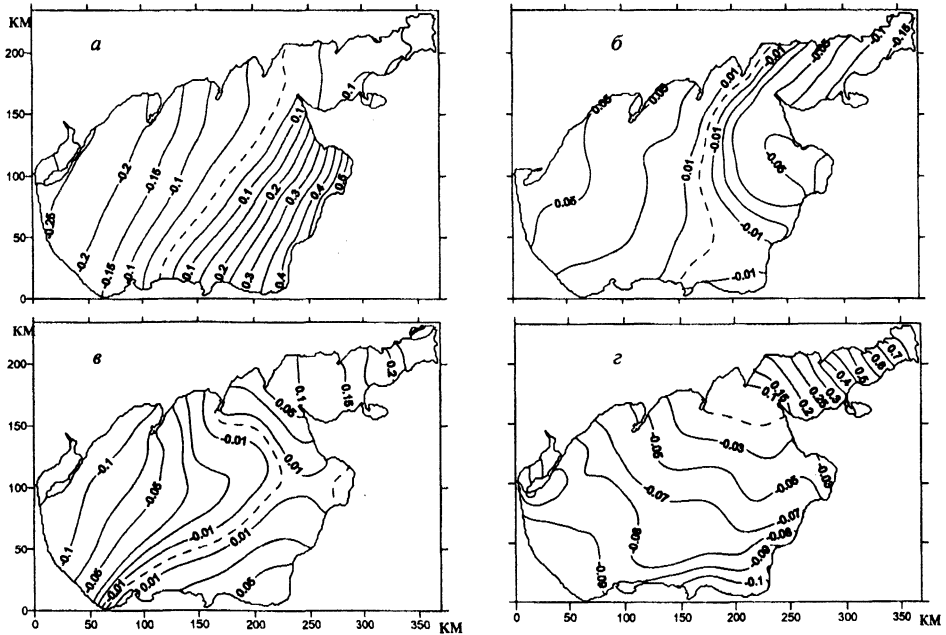
Анализ графиков уровня свидетельствует о сравнительно хорошем соответствии основных черт колебаний. Некоторые отличия, например по величинам максимумов сгонов и нагонов, могут быть объяснены определенными погрешностями при измерениях и вычислениях. Для ст. Геническ и Мариуполь модельные значения  $|\zeta|$ , полученные с использованием коэффициентов трения (9) и (10), лучше согласуются с измерениями, чем с коэффициентом (8).

Сделаем оценку относительного отклонения модельных и измеренных экстремальных значений уровня при тех коэффициентах, которые лучше всего согласуются с данными наблюдений. На ст. Геническ модельный абсолютный максимум  $|\zeta|_{\max}$  (при  $C_a^2$ ) на 8 см (или 16%) меньше, чем измеренный. Отклонение по времени его достижения отличается на 2,4 ч (или 0,7%). На ст. Мариуполь  $|\zeta|_{\max}$  (при  $C_a^2$ ) по модели на 4,2 см (или 9%) меньше, чем по измерениям. Модельное отклонение по времени достижения максимума здесь отличается от измеренного на 2 ч (или 1,4%).

Фактические величины сгонно-нагонных колебаний уровня Азовского моря бывают очень значительными, что приводит к возникновению опасных и даже катастрофических последствий. Эти колебания могут приводить к изменениям очертаний береговой линии: значительные пространства прибрежных районов в результате затопляются или, наоборот, вода отступает. В табл. 2 приведены экстремальные характеристики колебаний уровня Азовского моря по данным береговой сети гидрометеорологических станций за весь исторический период наблюдений. Эти сведения получены из базы данных МО УкрНИГМИ. Как видно, подъемы уровня более чем на 2 м относительно нулевых отметок возможны на ст. Геническ, Таганрог и Темрюк. В свою очередь падения уровня более чем на 2,5 м имеют место на ст. Таганрог и Ейск. Максимальный размах колебаний на большинстве станций превышает 3 м, на ст. Таганрог – более 6 м. Поскольку сгонно-нагонные колебания уровня Азовского моря имеют вид сейши с одной узловой линией, проходящей примерно через центр моря [14] (рис. 6), то наименьшие амплитуды колебаний наблюдаются вблизи узловой линии на ст. Бердянск, наибольшие – в отдаленных пунктах на ст. Геническ, Ейск, Таганрог.

Максимальные ( $\zeta_{\max}$ , см) и минимальные ( $\zeta_{\min}$ , см) отклонения уровня Азовского моря от среднемноголетних значений по данным береговой сети гидрометеорологических станций

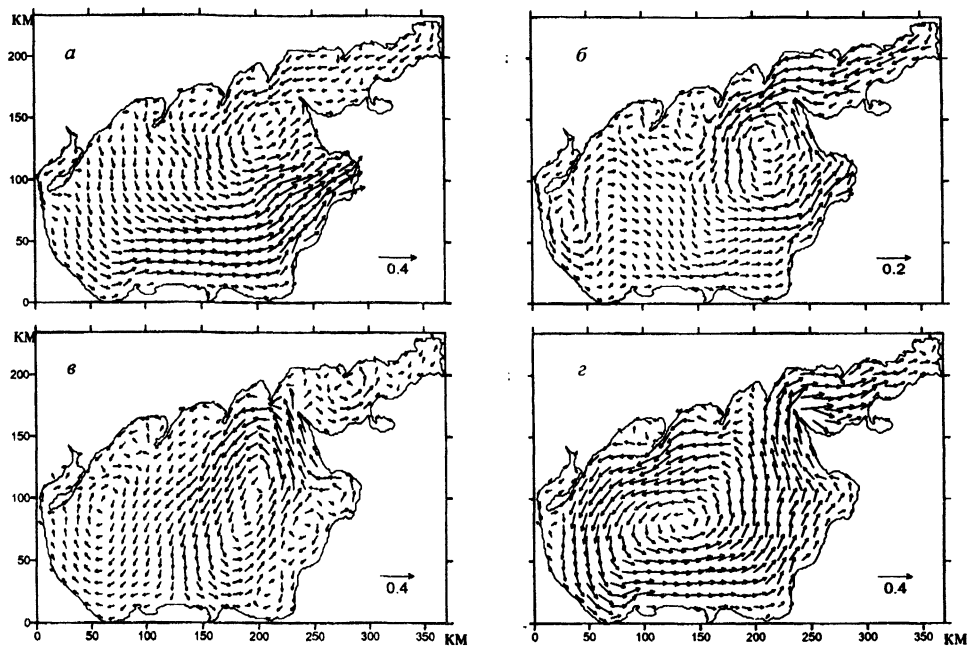
Береговые станции	Период наблюдений	Максимум	Минимум	Размах
Опасное	1945 – 2001	108	-85	193
Мысовое	1926 – 2001	139	-121	260
Генический	1878 – 2001	225	-187	412
Бердянск	1923 – 2001	84	-112	196
Мариуполь	1923 – 2001	128	-121	249
Таганрог	1882 – 1998	251	-358	609
Ейск	1915 – 1998	151	-287	438
Ясенская переправа	1928 – 1989	147	-156	303
Приморско-Ахтарск	1916 – 1998	188	-175	363
Темрюк	1910 – 1998	316	-84	400



Р и с. 6. Уровень моря в различные моменты времени: 96 ч (а), 168 ч (б), 240 ч (в), 314 ч (г)

На рис. 7 представлены поля уровня свободной поверхности и пространственные распределения величины и направления скорости течений на поверхности моря в моменты времени, соответствующие штормовым ситуациям ноября. Как следует из рис. 6, 7, интенсивные нагоны отмечаются на северо-восточном, значительные спады уровня – на западном побережье. При пе-

ремещении над морем циклонов с юга, запада или северо-запада возможны кратковременные значительные повышения уровня в восточной и юго-восточной частях моря.



Р и с. 7. Поля течений на горизонте  $z = 0$  в различные моменты времени: 96 ч (а), 168 ч (б), 240 ч (в), 314 ч (z)

В настоящей работе с применением трехмерной нелинейной модели проведены эксперименты по оценке влияния величины коэффициента поверхностного трения на колебания уровня Азовского моря. Поля приводного ветра и атмосферного давления получены по данным *Skiron*. Также проведено сравнение модельных и измеренных отклонений уровня на ст. Геническ и Мариуполь. Анализ результатов позволил сделать следующие выводы:

- численные эксперименты подтверждают чувствительность величин сгонов и нагонов к вариациям коэффициента поверхностного трения;
- на большинстве станций максимальные сгоны и нагоны получены при расчетах с использованием коэффициента трения (9), минимальные – при вычислении по формуле (8);
- основные черты колебаний уровня по результатам моделирования и измерений согласуются;
- сравнение средних модельных и измеренных значений уровня на двух прибрежных станциях (Геническ и Мариуполь) подтверждает правильность полученных результатов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов В.П. Режим ветра и ветрового волнения на Азовском море //Труды ГОИН. – 1978. – Вып. 134. – С. 48 – 56.
2. Белов В.П., Филиппов Ю.Г. Основные черты динамики вод Азовского моря и Керченского пролива // Там же. – Вып. 139. – С. 11 – 20.

3. Белов В.П., Филиппов Ю.Г. Динамика и вертикальная структура течений Азовского моря // Там же. – 1980. – Вып. 159. – С. 127 – 134.
4. Овсиенко С.Н. Расчет сгонно-нагонных колебаний Азовского моря // Труды Гидрометцентра СССР. – 1972. – Вып. 60. – С. 55 – 58.
5. Крукиер Л.А. Математическое моделирование гидродинамики Азовского моря при реализации проектов реконструкции его экосистемы // Математическое моделирование. – 1991. – №3. – С. 3 – 20.
6. Чикин А.Л. Трехмерная задача расчета гидродинамики Азовского моря // Там же. – 2001. – 13, №2. – С. 87 – 92.
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. Фомин В.В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ. – 2002. – Вып. 249. – С. 246 – 255.
9. 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.
10. Smagorinsky J. General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment // Mon. Wea. Rev. – 1963. – 91. – P. 99 – 164.
11. Large W.G., Pond S. Open ocean momentum fluxes in moderate to strong winds // J. Phys. Oceanogr. – 1981. – 11. – P. 324 – 326.
12. Hsu S.A. A mechanism for the increase of wind stress coefficient with wind speed over water surface: A parametric model // Ibid. – 1986. – 16. – P. 144 – 150.
13. Wu J. Wind-stress coefficients over sea surface to hurricane // J. Geophys. Res. – 1987. – №12. – P. 9704 – 9706.
14. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том III. Азовское море. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 218 с.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь

Материал поступил  
в редакцию 11.05.07

**ABSTRACT** Based on the three-dimensional non-linear model and using the prognostic fields of wind and atmospheric pressure, the Azov Sea level fluctuations are studied. The fields of the surface wind and the atmospheric pressure are obtained from the data of the prognostic system SKIRON. The numerical calculations are compared with the data of direct measurements of the sea level on the coastal stations. The degree of sensitivity of the calculated values of low and high sea levels to the value of the surface friction coefficient is studied.