

В. В. Фомин, Т. Я. Шульга

## Исследование сгонно-нагонных колебаний уровня Азовского моря с использованием прогностических полей ветра

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины Л. В. Черкесовым)

*With the use of the forecast fields of winds and atmospheric pressure, changes in the sea level are studied by the method of mathematical modeling. The results of numerical calculations are compared with the data of direct measurements of the sea level on coastal stations. The degree of sensitivity of the rated values of ebbs and floods to the surface friction coefficient is studied.*

В Азовском море за последние годы проводятся интенсивные проектно-исследовательские работы, направленные на освоение нефтяных и газовых ресурсов шельфа. Связанное с этим проектирование технологических платформ, а также решение других прикладных задач требуют информации о циркуляции вод и сгонно-нагонных колебаниях уровня моря. Одним из способов, позволяющих дать прогноз сгонно-нагонных колебаний уровня, является метод численного моделирования. Этим методом в работах [1, 2] анализировалась динамика вод Азовского моря на основе линейных математических моделей. В статье [3] использована трехмерная нелинейная модель [4] для исследования волн и течений, возникающих в Азовском море под действием нестационарного и однородного по пространству ветра.

В настоящей работе указанная выше математическая модель применена для изучения сгонно-нагонных 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 данные метеорологических наблюдений. Проведена верификация модели по результатам прямых измерений уровня на станциях Геничеськ и Мариуполь.

1. В качестве исходных принимаются нелинейные уравнения движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [3]. На свободной поверхности выполняются кинематическое и динамические условия. На дне ( $z = -H(x, y)$ ) нормальная составляющая скорости равна нулю. Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [3], на боковых границах выполняются условия прилипания. В начальный момент времени движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна.

Для численных расчетов выбрано три коэффициента поверхностного трения  $C_a^i$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Первый взят из известного соотношения, описанного в работе [5]:

$$C_a^1 = \begin{cases} 1,14 \cdot 10^{-3}, & |\mathbf{W}| \leq 10 \text{ м/с}, \\ (0,49 + 0,0065|\mathbf{W}|) \cdot 10^{-3}, & |\mathbf{W}| > 10 \text{ м/с}. \end{cases} \quad (1)$$

Согласно расчетам, приведенным в статье [6], для  $C_a^2$  используется формула

$$C_a^2 = k^2(14,56 - 2 \ln |\mathbf{W}|)^{-2}, \quad (2)$$

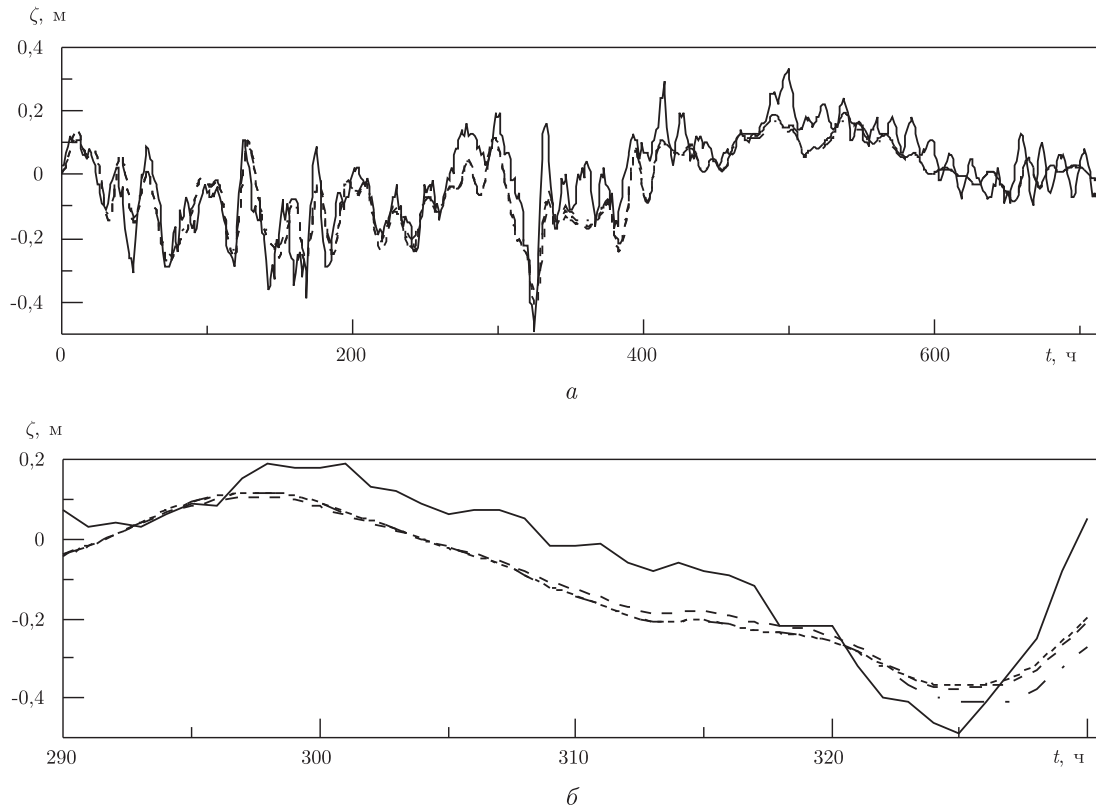


Рис. 1. Изменения уровня моря на станции Генчиск. Пунктирные линии — модельные данные, сплошная линия — данные измерений. В интервале 800 ч (а); в интервале ( $290 \leq t \leq 330$  ч) 40 ч (б)

где  $k = 0,4$  — постоянная Кармана. Третий коэффициент рассчитывается по наиболее современному представлению [7]:

$$C_a^3 = \begin{cases} 1,2 \cdot 10^{-3}, & |\mathbf{W}| \leq 7,5 \text{ м/с}, \\ (0,8 + 0,0065|\mathbf{W}|) \cdot 10^{-3}, & |\mathbf{W}| > 7,5 \text{ м/с}. \end{cases} \quad (3)$$

В исходных уравнениях, граничных и начальных условиях осуществляется переход от координаты  $z$  к координате  $\sigma$  [3]. Численный алгоритм решения по времени базируется на применении двухслойных разностных схем. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществлялся в соответствии с критерием устойчивости Куранта для баротропных волн.

**2.** Исходными данными являются рельеф дна и конфигурация береговой линии Азовского моря (см. рис. 1 в [3]). В качестве входных метеорологических данных используются результаты численного моделирования полей приводного ветра и атмосферного давления, полученные с помощью региональной прогностической системы SKIRON за ноябрь 2006 г. Пространственное разрешение атмосферных полей составляет 10 км, дискретность по времени — 2 ч.

Для верификации модели были привлечены данные наблюдений за уровнем моря на береговых гидрометеорологических станциях и постах Азовского моря за ноябрь 2006 г. Эта информация представляет собой ежечасные измерения уровня с помощью самописцев

на станциях Геническ и Мариуполь, а также измерения с шестичасовой дискретностью по футштоку для остальных станций украинского побережья Азовского бассейна.

Моделирование уровня моря, по данным SKIRON, проводится для 30-ти суток: с 1 по 30 ноября 2006 г. Расчетные значения сгонов и нагонов, возникающих под действием указанного ветра, отмечаются на береговых станциях Азовского моря, расположенных по его периметру (см. рис. 1 в [3]):

Геническ — пункт наблюдений  $A_1$ ; Бердянск —  $A_2$ ; Мариуполь —  $A_3$ ; Таганрог —  $A_4$ ; Ейск —  $A_5$ ; Приморско-Ахтарск —  $A_6$ ; Темрюк —  $A_7$ ; Опасное —  $A_8$ ; Мысовое —  $A_9$ .

**3.** В серии численных экспериментов оценим влияние коэффициента поверхностного трения на максимумы сгонов и нагонов на станциях побережья. Данный эксперимент проводится с целью изучения чувствительности решения к коэффициенту поверхностного трения. Сравним варианты результатов моделирования, полученных при расчете по формулам (1)–(3), по относительным изменениям экстремумов  $|\zeta|$  в пунктах  $A_1$ – $A_9$ . Величину относительного отклонения решений ( $\delta, \%$ ) будем находить по формуле:

$$\delta|\zeta| = 100\% \cdot \frac{||\zeta|_{\text{наиб}} - |\zeta|_{\text{наим}}|}{||\zeta|_{\text{наиб}}|}.$$

В табл. 1 приведены максимальные значения  $|\zeta|_{\text{max}}$  нагонов и сгонов и отклонения результатов ( $\delta$ ) в зависимости от трех коэффициентов поверхностного трения  $C_a^i$ , ( $i = 1, 2, 3$ ).

Из анализа данных, приведенных в первой (верхней) части табл. 1, следует, что максимальные нагоны имеют место на береговой станции Таганрог ( $A_4$ ). Они составляют для коэффициентов:  $C_a^1 - 0,75$  м (в 331,7 ч);  $C_a^2 - 0,829$  м (в 331,4 ч);  $C_a^3 - 0,738$  м (в 331,9 ч). Отклонение нагонов в этом пункте максимально и равно 11%. Минимальные нагоны отмечаются на станции Геническ ( $A_1$ ) и соответственно равны:  $C_a^1 - 0,171$  м (в 538,1 ч);  $C_a^2 - 0,192$  м (в 538,2 ч);  $C_a^3 - 0,192$  м (в 538,2 ч). Наименьшее отклонение при расчете

Таблица 1. Максимальные нагоны и сгоны и соответствующие им моменты времени, отклонения между наибольшими и наименьшими значениями  $|\zeta|_{\text{max}}$  для коэффициентов поверхностного трения

Пункт наблюдений	$C_a^1$		$C_a^2$		$C_a^3$		$\delta, \%$
	$ \zeta _{\text{max}}, \text{см}$	$t_{\text{extr}}, \text{ч}$	$ \zeta _{\text{max}}, \text{см}$	$t_{\text{extr}}, \text{ч}$	$ \zeta _{\text{max}}, \text{см}$	$t_{\text{extr}}, \text{ч}$	
<b>1.</b> $A_1$	17,1	538,1	19,2	538,2	19,2	538,2	10,9
$A_2$	22,4	137,9	22,3	137,8	22,3	137,8	0,2
$A_3$	38,8	142,1	43,8	219,1	39,3	142,1	10,2
$A_4$	75,0	331,7	82,9	331,4	73,8	331,9	11,0
$A_5$	48,2	329,3	51,9	330,1	48,0	329,3	7,6
$A_6$	74,2	322,2	73,3	322,9	68,1	321,7	8,3
$A_7$	33,0	319,9	32,4	163,4	32,5	163,4	1,4
$A_8$	22,0	163,8	22,2	163,6	22,3	163,6	1,5
$A_9$	13,6	161,5	14,0	161,3	14,1	161,3	3,5
<b>2.</b> $A_1$	37,7	324,6	41,0	326,4	36,9	324,5	10,1
$A_2$	15,3	163,2	17,1	162,9	16,9	163,1	0,2
$A_3$	15,5	417,8	17,4	417,8	17,5	417,8	11,4
$A_4$	24,9	420,2	27,7	500,0	27,7	500,1	10,1
$A_5$	15,8	496,6	17,8	496,7	17,8	496,8	12,7
$A_6$	17,3	292,4	19,4	292,4	19,5	292,4	11,2
$A_7$	17,8	138,3	19,1	218,8	18,1	138,6	7,2
$A_8$	17,9	219,4	20,1	219,4	18,6	219,4	11,0
$A_9$	27,0	326,0	28,9	326,2	25,8	325,7	10,7

нагонов с разными коэффициентами поверхностного трения имеет место в Бердянске ( $A_2$ ) и составляет 0,2%.

Во второй (нижней) части табл. 1 даны максимальные величины сгонов в тех же пунктах. Анализируя приведенные данные, отметим, что наибольшие сгоны для различных коэффициентов поверхностного трения имеют место на береговой станции Геническ ( $A_1$ ): 0,377 м ( $C_a^1$ ,  $t_{\text{extr}} = 1324,6$  ч); 0,41 м ( $C_a^2$ ,  $t_{\text{extr}} = 326,4$  ч); 0,369 м ( $C_a^3$ ,  $t_{\text{extr}} = 324,5$  ч), где  $t_{\text{extr}}$  — время достижения максимальных нагонов и сгонов в пунктах  $A_1$ – $A_9$ . Максимальное отклонение, полученное при расчете сгонов, равно 12,7% и наблюдается в Ейске ( $A_5$ ). Минимальные сгоны отмечаются в Бердянске ( $A_2$ ) и соответственно равны: 0,153 м ( $C_a^1$ ,  $t_{\text{extr}} = 163,2$  ч); 0,171 м ( $C_a^2$ ,  $t_{\text{extr}} = 162,9$  ч); 0,169 м ( $C_a^3$ ,  $t_{\text{extr}} = 163,1$  ч). Наименьшее отклонение при расчете нагонов с разными коэффициентами поверхностного трения имеет место в Бердянске ( $A_2$ ) и составляет 0,2%.

Для пунктов  $A_1$ ,  $A_3$ – $A_5$  наибольшие значения нагонов наблюдаются при коэффициенте  $C_a^2$ , для  $A_2$ ,  $A_6$ ,  $A_7$  — при  $C_a^1$ , для  $A_8$ ,  $A_9$  — при  $C_a^3$ . Максимальные сгоны в пунктах  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_4$ ,  $A_5$ ,  $A_7$ – $A_9$  имеют место при  $C_a^2$ , в пунктах  $A_3$  и  $A_6$  — при  $C_a^3$ . Следовательно, в большинстве пунктов наибольшие сгоны и нагоны получены при расчетах, где коэффициент трения вычисляется по формуле (2), а минимальные — по формуле (1).

Из анализа величины погрешности ( $\delta$ , %), которую дают вычисления по формулам (1)–(3), видно, что для нагонов она не превышает 11%, а для сгонов — 12,7%.

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

4. Проведем анализ результатов моделирования и прямых измерений уровня моря, полученных на основании показаний мареографов, за тот же расчетный период на береговых станциях Геническ и Мариуполь. Сравнение проводилось по таблицам ежечасных высот уровня моря Государственной метеорологической службы Украины за ноябрь 2006 г.

Графики зависимостей уровня моря от времени, полученные по данным наблюдений и по модели, показаны на рис. 1, 2. Видно, что общие черты колебаний уровня моря для указанных береговых станций Азовского моря в основном совпадают. В Геническе (см. рис. 1, а) наибольшее экстремальное значение уровня — это сгон как по модели, так и по наблюдениям, который достигается в 325 ч. Отличие состоит в величине сгона, по измерениям она больше, чем по расчетам. Значение сгона по измерениям составляет 0,49 м, ближайшее к нему расчетное значение 0,41 м получено при  $C_a^2$ . Отклонение величины  $|\zeta|_{\text{max}}$  составляет 8 см или 16%. Наибольший из нагонов на этой станции (см. рис. 1, а) наблюдается в 501 ч. По измерениям нагон составляет 0,33 м, самое близкое к нему модельное значение 0,22 м отмечается при  $C_a^2$  и  $C_a^3$ .

На станции Мариуполь максимальный наблюдаемый и расчетный подъем уровня имеет место в 145 ч (см. рис. 2, б). Здесь величина нагона по модели (0,48 м при  $C_a^2$ ) больше, чем по данным наблюдений (0,44 м) на 4,2 см или 9%. Наибольший сгон, согласно с измерениями, составляет 0,30 м и также больше, чем модельный (0,18 м при  $C_a^2$  и  $C_a^3$ ) на 12 см.

Анализ графиков уровня свидетельствует о сравнительно хорошем согласии основных черт колебаний. Некоторые отличия, например, по величинам максимумов сгонов и нагонов могут быть объяснены определенными погрешностями при измерениях и вычислениях.

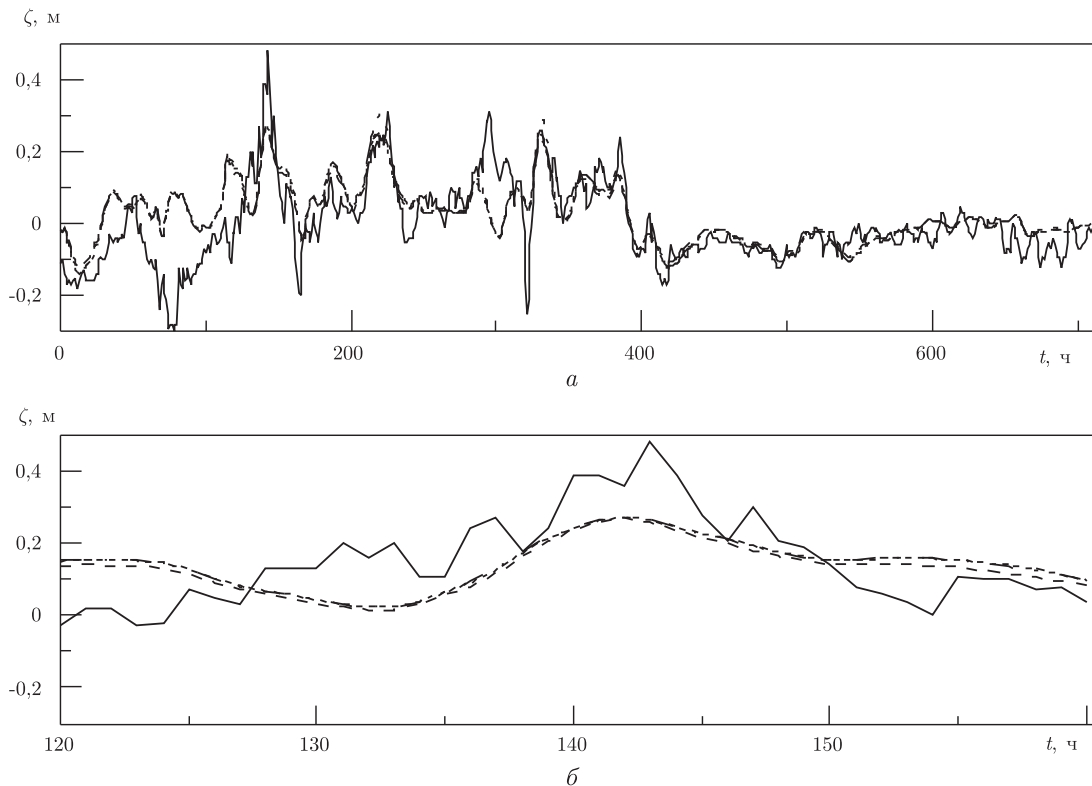


Рис. 2. Изменения уровня моря на станции Мариуполь. Пунктирные линии — модельные данные, сплошная линия — данные измерений. В интервале 800 ч (а); в интервале ( $120 \leq t \leq 160$  ч) 40 ч (б)

На береговых станциях Геническ и Мариуполь модельные значения  $|\zeta|_{\max}$ , полученные с использованием коэффициентов трения (2) и (3), лучше согласуются с измерениями, чем с коэффициентом формулы (1).

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 этого затопляются или наоборот — вода отступает. В табл. 2 приведены экстремальные характеристики колеба-

Таблица 2. Максимальные и минимальные отклонения уровня Азовского моря от среднееголетних значений, по данным береговой сети гидрометеорологических станций

Береговые станции	Период наблюдений, год	$ \zeta _{\max}$ , см	$ \zeta _{\min}$ , см	Размах колебаний (от max до min), см
Опасное	1945–2001	108	–85	193
Мысовое	1926–2001	139	–121	260
Геническ	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
Приморско-Ахтарск	1916–1998	188	–175	363
Темрюк	1910–1998	316	–84	400

ний 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 2 м относительно нулевых отметок возможны в районах Геническа, Таганрога и Темрюка. В свою очередь, падения уровня более чем на 2,5 м имеют место в Таганроге и Ейске. Максимальный размах колебаний на большинстве станций превышает 3 м, а у Таганрога — более 6 м. Поскольку сгонно-нагонные колебания уровня Азовского моря имеют вид сейши с одной узловой линией, проходящей примерно через центр моря [4], то наименьшие амплитуды колебаний наблюдаются вблизи узловой линии — в Бердянске и соответственно наибольшие — в отдаленных пунктах: станций Геничеськ, Ейск, Таганрог.

*Авторы выражают благодарность С. В. Станичному за предоставление массивов атмосферных полей.*

1. Белов В. П., Филиппов Ю. Г. Основные черты динамики вод Азовского моря и Керченского пролива // Тр. ГОИН. — 1978. — Вып. 139. — С. 11–20.
2. Белов В. П., Филиппов Ю. Г. Динамика и вертикальная структура течений Азовского моря // Там же. — 1980. — Вып. 159. — С. 127–134.
3. Фомин В. В., Шульга Т. Я. Исследование волн и течений, возникающих под действием ветра в Азовском море // Доп. НАН України. — 2006. — № 12. — С. 110–115.
4. Фомин В. В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Науч. тр. УкрНИГМИ. — 2002. — Вып. 249. — С. 246–255.
5. Large W. G., Pond S. Open ocean momentum fluxes in moderate to strong winds // J. Phys. Oceanogr. — 1981. — **11**. — P. 324–326.
6. 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.
7. Wu J. Wind-stress coefficients over sea surface to hurricane // J. Geophys. Res. — 1987. — C12. — P. 9704–9706.

*Морской гидрофизический институт  
НАН Украины, Севастополь*

*Поступило в редакцию 21.05.2007*