

# *Анализ результатов наблюдений и методы расчета гидрофизических полей океана*

УДК 532.59

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

## **Экстремальные отклонения уровня и скорости течений, вызываемые постоянным ветром в Азовском море**

Методом численного моделирования исследовано влияние скорости постоянного ветра на течения и колебания уровня Азовского моря. С использованием трехмерной нелинейной численной модели установлены районы, где имеют место максимальные и минимальные величины скоростей поверхностных стационарных течений и наибольшие отклонения уровня в открытой части Азовского моря. На приведенных картах показаны пункты акватории, в которых достигаются экстремальные значения отклонений уровня и наибольшие скорости течений. Выполнен анализ влияния скорости постоянного ветра на время достижения экстремальных значений подъемов и понижений уровня и скоростей течений.

**Ключевые слова:** численное моделирование,  $\sigma$ -координатная модель, сгонно-нагонные процессы, поверхностные течения, экстремальные отклонения уровня.

### **Введение**

Изучение колебаний уровня моря связано с научными и практическими задачами, включая строительство береговых гидротехнических сооружений, создание морских навигационных карт, прогноз наводнений, определение движения берегов. При решении некоторых прикладных проблем возникает необходимость определения положения экстремальных отклонений уровня по всей акватории Азовского моря. Представляет интерес установление тех районов моря, в которых скорости стационарных ветровых течений будут наибольшими.

В ряде работ, посвященных изучению течений и волнения в Азовском море, исследовался вопрос о максимальных сгонах и нагонах, имеющих место на ряде береговых станций, а также о наибольших значениях скоростей возникающих течений. В статье [1] с использованием трехмерной нелинейной  $\sigma$ -координатной математической модели решена задача о сгонно-нагонных колебаниях в Азовском море при воздействии постоянного ветра, в [2] аналогичные исследования проведены для полей нестационарного ветра, в [3] – для возмущений, вызванных прохождением циклонов.

В данной работе на основании анализа результатов численных экспериментов, проведенных с использованием указанной выше модели, установлены районы расположения наибольших изменений уровня моря и скоростей стационарных течений, вызванных постоянным ветром в открытой части Азовского моря.

© В.А. Иванов, Л.В. Черкесов, Т.Я. Шульга, 2011

## Постановка задачи

**Граничные и начальные условия.** Введем систему координат, в которой ось  $x$  ориентирована на восток,  $y$  – на север,  $z$  – от невозмущенной поверхности вертикально вверх. Исходные уравнения представляют собой 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 все обозначения общепринятые.

Компоненты тензора турбулентных напряжений Рейнольдса  $\tau_{ij}$  в уравнениях (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 [6]. Для параметризации коэффициента вертикальной турбулентной вязкости  $K_M$  использовалась теория Меллора – Ямады [7].

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 трения ветра,  $W_x$ ,  $W_y$  – компоненты вектора скорости ветра  $\mathbf{W}$  на высоте 10 м над уровнем моря. Для численных расчетов коэффициент поверхностного трения  $C_a$  выбран в соответствии с работой [8].

На боковых границах выполняется условие прилипания. На дне ( $z = -H(x, y)$ ) нормальная составляющая скорости равна нулю:

$$\left( w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) \Big|_{z=-H} = 0. \quad (8)$$

Придонные касательные напряжения трения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [4]:

$$K_M \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H} = (\tau_{1x}, \tau_{1y}), \quad (9)$$

где  $\tau_{1x} = C_b u \sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $\tau_{1y} = C_b v \sqrt{u^2 + v^2}$ . Здесь коэффициент донного трения  $C_b$  находится по формуле  $C_b = k^2 \ln^{-2}(z_2/z_0)$ , где  $z_2$  – 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:

$$u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \quad \zeta(x, y, z, 0) = 0. \quad (10)$$

**Численная реализация модели и выбор параметров.** В исходных уравнениях (1) – (4), граничных условиях (6) – (9) и начальных (10) осуществляется переход от координаты  $z$  к  $\sigma$ -координате [4, 5]:  $x^* = x$ ,  $y^* = y$ ,  $\sigma = (z - \zeta)/(H + \zeta)$ ,  $t^* = t$ , где  $-1 \leq \sigma \leq 0$ .

В численных экспериментах используются равномерные шаги по горизонтальным координатам ( $\Delta x = \Delta y = 1350$  м) и по  $\sigma$ -координате. Количество расчетных уровней по вертикали равно 11. Уравнения решаются с шагом  $\Delta t = 18$  с для определения осредненных двумерных компонент скорости и уровня моря и с шагом  $10\Delta t$  – для вычисления отклонений от найденных средних и вертикальной компонент скорости. Рельеф дна и конфигурация береговой линии Азовского моря в узлах сетки взяты с навигационных карт.

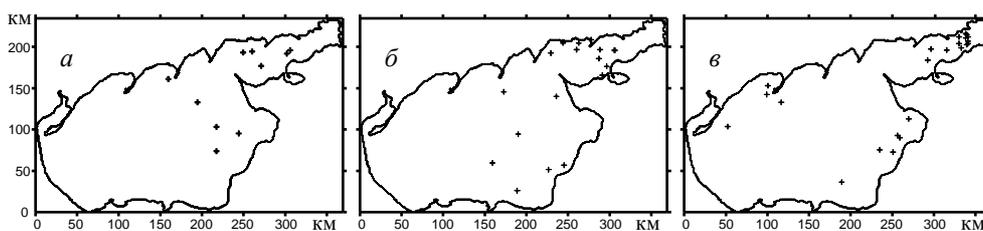
Установившиеся движения в Азовском море формируются при нормальных условиях погоды. Эти условия характеризуются тем, что скорость ветра, достигнув определенного распределения над морем, продолжительное время мало меняется. В численных экспериментах при моделировании стационарных течений поле ветра задается в виде однородного по пространству ветра, действующего над Азовским морем начиная с момента времени  $t = 0$ . Его скорость ( $\mathbf{W}_{st}$ ) первые 3 ч ( $0 < t \leq 3$  ч) нарастает со временем по линейному закону, достигает своего наибольшего значения и далее не меняется. Выход течений на установившийся режим осуществляется под действием постоянного западного ветра, скорость которого изменяется в пределах 5 – 15 м/с ( $\mathbf{W}_{st}^1 = 5$ ,  $\mathbf{W}_{st}^2 = 10$ ,  $\mathbf{W}_{st}^3 = 15$  м/с).

Момент времени выхода течений на установившейся режим ( $t = t_0$ ) определяем из условия, что относительные изменения полной энергии, осредненной по объему моря на смежных шагах по времени, не превосходят 1% [1].

### Анализ результатов численных экспериментов

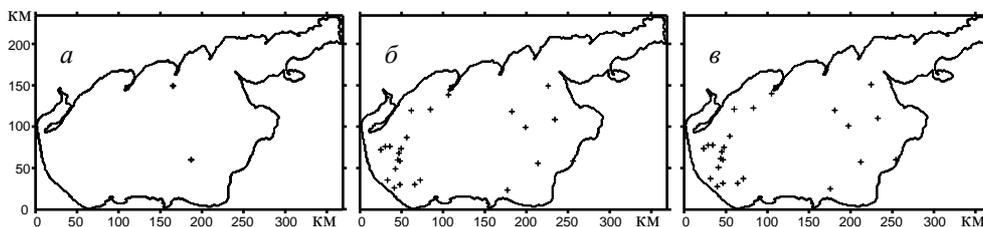
Анализ опубликованных метеорологических данных [9] позволил выделить для района Азовского моря характерные типы погоды. Антициклонический тип погоды возникает в теплый период (апрель – октябрь) и характеризуется ветрами со скоростью более 8 м/с, когда Азовское море оказывается в тыловой части антициклона, смещающегося с запада на восток. В это время преобладают восточные и северо-восточные ветры. Слабый циклонический тип погоды [10] возникает при прохождении над Азовским морем слабых атмосферных фронтов или периферий отдельных циклонов. Средняя повторяемость его 12% в холодный период и 22% в теплый. Этот тип погоды характеризуется слабыми и умеренными ветрами переменных направлений, облаками среднего и нижнего ярусов; иногда выпадают слабые осадки. Циклонический тип погоды возникает при прохождении над Черным и Азовским морями средиземноморских циклонов или циклонов, развивающихся на хорошо выраженных атмосферных фронтах севернее параллели 50° с. ш. Повторяемость его зимой и летом не превышает 15%. Для этого типа погоды характерны ветры со скоростью 6 – 14 м/с вначале восточных, а затем южных и западных направлений. Западные ветры обычно бывают порывистыми и шквалистыми. Моделирование проводилось для наиболее продолжительного слабого циклонического типа погоды.

На рис. 1 представлены пункты расположения максимальных отклонений уровня в открытой части Азовского моря, вызываемых действием постоянного ветра различных скоростей. Эти пункты на рисунках отмечались в течение всего расчетного периода (72 ч). Отсюда (рис. 1, *a – в*) видно, что расположения максимумов при различных скоростях действующего ветра имеют как общие черты (максимумы сосредоточены в восточной части акватории моря), так и различия. Отметим, что воздействие ветра больших скоростей приводит к смещению координат максимумов в сторону Таганрогского залива. Действие ветра со скоростью 15 м/с вызывает максимумы отклонений уровня и в западной части Азовского бассейна.



**Р и с. 1.** Положения максимумов отклонений уровня в Азовском море в различные моменты времени под действием западного ветра со скоростью 5 м/с (*a*); 10 м/с (*б*); 15 м/с (*в*)

На рис. 2 показаны положения минимальных отклонений уровня Азовского моря с дискретностью 1 ч, вызываемых действием постоянного ветра различных скоростей. Отсюда видно, что наибольшие понижения уровня в основном имеют место в западной части моря. При бóльших скоростях постоянного ветра минимумы отклонений уровня наблюдаются и в восточной части Азовского моря.



Р и с. 2. Положения минимумов отклонений уровня в Азовском море в различные моменты времени под действием западного ветра со скоростью 5 м/с (а); 10 м/с (б); 15 м/с (в)

В табл. 1 приведены максимальные и минимальные значения отклонений уровня моря, время их достижения и соответствующие им координаты в зависимости от скорости ветра в течение всего расчетного периода. Данные в табл. 1 являются обобщением результатов, представленных на рис. 1 и 2.

Т а б л и ц а 1

**Максимальные и минимальные значения отклонений уровня моря (м), время их достижения (ч, мин) и соответствующие им координаты (км) для трех значений скорости ветра**

Скорость ветра, м/с	$\zeta_{\max}$ , м	$t_{\max}$ , ч, МИН	$x_{\max}$ , км	$y_{\max}$ , км	$\zeta_{\min}$ , м	$t_{\min}$ , ч, МИН	$x_{\min}$ , км	$y_{\min}$ , км
$W_{st}^1 = 5$	0,20	17.10	366,51	219,61	-0,10	13.23	4,02	95,07
$W_{st}^2 = 10$	0,69	18.46	367,86	218,27	-0,39	13.47	4,02	107,13
$W_{st}^3 = 15$	1,65	19.48	343,69	224,96	-1,05	14.09	5,37	87,04

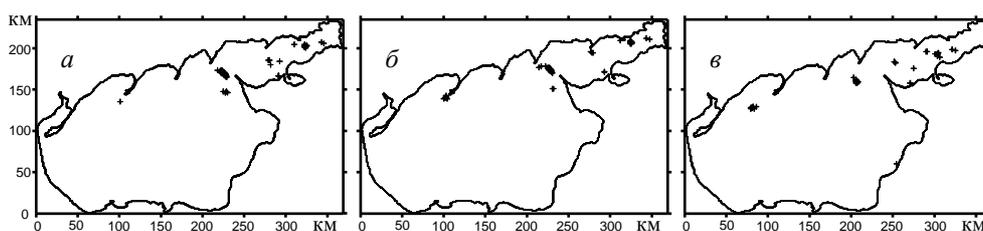
Из анализа приведенных данных видно, что координаты максимумов и минимумов  $\zeta$  для рассмотренных скоростей ветра изменяются незначительно. Различия состоят в величинах экстремальных отклонений уровня и времени их достижения. Из сравнения значений максимумов уровня следует, что они возрастают в 3,5 и 8,3 раза для бóльших в 2 и 3 раза значений  $W_{st}$  (0,2 м при  $W_{st}^1$ ; 0,69 м при  $W_{st}^2$ ; 1,65 м при  $W_{st}^3$ ). Как видно из табл. 1, под действием ветра бóльшей скорости достигаются и бóльшие значения понижений уровня: -0,1 м при  $W_{st}^1$ ; -0,39 м при  $W_{st}^2$ ; -1,05 м при  $W_{st}^3$ . Анализ результатов расчетов показывает, что действие ветра со скоростями  $W_{st}^2$  и  $W_{st}^3$  (в 2 и 3 раза бóльшими, чем  $W_{st}^1$ ) приводит к увеличению  $\zeta_{\min}$  в 4 и 10 раз соответственно.

Время достижения экстремальных отклонений уровня отмечается через 10 – 16 ч после начала действия ветра и зависит от его скорости. По данным, приведенным в табл. 1, при сравнении изменения величины скорости ветра и времени достижения наибольших и наименьших значений  $\zeta$  получено, что это время больше для ббльших скоростей ветра. Так, разница во времени достижения  $\zeta_{\max}$  при  $W_{st}^1$  и  $W_{st}^3$  составляет 2 ч 38 мин, а разница во времени достижения  $\zeta_{\min}$  при тех же скоростях ветра – 46 мин. Таким образом, стационарный ветер в 3 раза большей скорости дольше на 14% формирует максимальный подъем уровня и на 4% – минимальное понижение уровня моря.

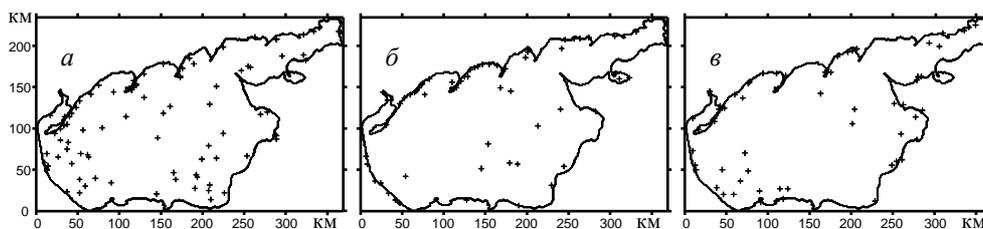
Сравним величины максимальных и минимальных значений  $\zeta$  в открытой части Азовского моря (табл. 1) с экстремальными значениями сгонов и нагонов, отмеченными в ряде пунктов его побережья [1]. Наибольшие нагоны при скоростях ветра 5, 10 и 15 м/с отмечаются в Таганрогском заливе и составляют 0,17; 0,60 и 1,42 м соответственно. При тех же скоростях ветра в Азовском море достигаются значения  $\zeta_{\max}$ , равные 0,20; 0,69 и 1,65 м. Таким образом, максимальные возвышения уровня в открытой части Азовского моря на 15, 13 и 14% превышают нагоны на побережье. Аналогично, сравнивая наибольшие значения сгонов (Геничеськ) и  $\zeta_{\min}$ , отметим, что при рассматриваемых скоростях ветра сгон и максимальное понижение уровня отличаются мало.

В настоящее время прогнозы течений практически не составляются, причиной тому является недостаточное количество наблюдений, которые позволили бы проверить и уточнить расчеты скоростей течений. Чтобы разрабатывать и использовать методы расчета и прогноза скоростей морских течений в оперативной практике, необходимо хотя бы в нескольких отдельных точках моря проводить регулярные наблюдения за скоростями течений.

На рис. 3, 4 показаны районы, где имеют место максимальные и нулевые величины скоростей поверхностных течений в открытой части Азовского моря, вызываемых действием постоянного ветра различных скоростей. Эти пункты на рисунках показаны с дискретностью 1 ч в течение всего расчетного периода (72 ч). Из рис. 3 видно, что при различных скоростях действующего ветра положение максимумов смещено в сторону Таганрогского залива. Как следует из рис. 4, положения нулевых значений скоростей течений сильно разбросаны по акватории.



**Р и с. 3.** Положения максимумов скоростей течений Азовского моря на горизонте 1 м в различные моменты времени под действием западного ветра со скоростью 5 м/с (а); 10 м/с (б); 15 м/с (в)



**Р и с. 4.** Положения минимумов скоростей течений Азовского моря на горизонте 1 м в различные моменты времени под действием западного ветра со скоростью 5 м/с (а); 10 м/с (б); 15 м/с (в)

Т а б л и ц а 2

**Максимальные значения скоростей течений (м/с) на различных глубинах Азовского моря, время их достижения (ч, мин) и соответствующие им координаты (км) для трех значений скорости ветра**

Скорость ветра, м/с	Горизонт, м	$U_{\max}$ , м/с	$t_{\max}$ , Ч, МИН	$x_{\max}$ , КМ	$y_{\max}$ , КМ
$W_{st}^1 = 5$	1	0,16	8.00	236,29	174,08
	3	0,13	8.02	236,39	173,44
	5	0,12	8.22	237,01	173,31
	10	0,08	9.44	235,34	173,00
$W_{st}^2 = 10$	1	0,49	8.35	236,29	172,74
	3	0,44	8.55	236,60	173,32
	5	0,41	8.26	237,09	171,73
	10	0,29	9.34	236,86	171,98
$W_{st}^3 = 15$	1	1,06	9.45	237,63	171,40
	3	0,97	10.47	237,99	172,28
	5	0,91	11.19	237,76	171,88
	10	0,64	12.45	238,46	171,50

В табл. 2 приведены максимальные значения скоростей течений на различных горизонтах, время их достижения и соответствующие им координаты в зависимости от скорости ветра в течение всего расчетного периода. Из анализа данных, представленных в этой таблице, видно, что при увеличении скорости постоянного ветра в 2 и 3 раза скорости течений в поверхностном слое достигают значений 0,16; 0,49 и 1,06 м/с (возрастают соответственно в 3 и 6,6 раза). Такое же соотношение между величинами скоростей течений для

рассматриваемых  $W_{st}$  прослеживается и на других горизонтах. С глубиной происходит уменьшение скорости течений, ее наименьшее значение отмечается в придонном слое. Сравнивая координаты максимумов, отметим, что и с глубиной, и при разных значениях  $W_{st}$  их положение практически не меняется. Время достижения наибольших значений скоростей течений увеличивается (на 4 и 18%) под действием ветра больших скоростей ( $W_{st}^2$  и  $W_{st}^3$  соответственно). Оценивая разницу во времени достижения максимумов скорости, видим, что  $t_{max}$  под действием постоянного ветра рассматриваемых скоростей в поверхностном слое достигается на 18, 12 и 21% раньше, чем в придонном слое.

### Выводы

В результате численного моделирования циркуляции вод Азовского моря, вызванной действием постоянного ветра различных скоростей, получены следующие выводы:

- установлены пункты в открытой части моря, в которых отмечаются максимальные значения отклонений уровня и наибольшие скорости течений;
- получены оценки влияния скорости действующего постоянного ветра на время достижения наибольших подъемов и понижений уровня и максимальных значений скоростей течений на различных горизонтах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование эволюции поля примеси в Азовском море при наличии стационарных течений // Доп. НАН України. – 2007. – № 7. – С. 116 – 120.
2. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование влияния течений, вызванных западным ветром, на эволюцию областей загрязнения в Азовском море // Там же. – 2007. – № 3. – С. 112 – 117.
3. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование сгонно-нагонных явлений в Азовском море, вызванных атмосферными возмущениями // Там же. – 2006. – № 11. – С. 109 – 113.
4. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of three dimensional coastal ocean circulation model // Three-Dimensional Coastal Ocean Models / Ed. N. Heaps. – Washington, D. C.: American Geophysical Union. – 1987. – 4. – P. 1 – 16.
5. *Фомин В.В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ. – 2002. – Вып. 249. – С. 246 – 255.
6. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations. I. The basic experiment // Mon. Wea. Rev. – 1963. – 91. – P. 99 – 164.
7. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. – 1982. – 20. – P. 851 – 875.
8. *Hsu S.A.* A mechanism for the increase of wind stress coefficient with wind speed over water surface: A parametric model // J. Phys. Oceanogr. – 1986. – 16. – P. 144 – 150.

9. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море. – СПб.: Гидрометеоздат, 1991. – 234 с.
10. *Лоция* Азовского моря. – <http://katamaran.ru/maps/azov/2.htm>.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь  
E-mail: shulgaty@mail.ru

Материал поступил  
в редакцию 13.11.09  
После доработки 27.04.10

**АНОТАЦІЯ** Методом чисельного моделювання досліджено вплив швидкості постійного вітру на течії та коливання рівня Азовського моря. З використанням тривимірної нелінійної чисельної моделі знайдені райони розташування максимальних та мінімальних значень швидкостей поверхневих стаціонарних течій і найбільших відхилень рівня у відкритій частині Азовського моря. На наведених картах відмічені пункти акваторії, в яких досягаються екстремальні значення відхилень рівня та найбільші швидкості течій. Зроблено аналіз впливу швидкості постійного вітру на час досягнення екстремальних значень підняття та опускання і швидкостей течій.

**Ключові слова:** чисельне моделювання,  $\sigma$ -координатна модель, згінно-нагінні процеси, поверхневі течії, екстремальні відхилення рівня.

**ABSTRACT** Method of numerical simulation is used to study influence of constant wind velocity upon the currents and the sea level fluctuations in the Azov Sea. The three-dimensional non-linear model permits to define the regions where maximum and minimum values of surface stationary currents' velocities and locations of the largest level deviations in the open part of the Azov Sea take place. The represented charts show the points in the sea area where extremal values of the level deviations and the highest currents' velocities are achieved. Analyzed is the influence of constant wind velocity upon the time of achieving extremal values both of the level elevation and lowering, and the currents' velocities.

**Keywords:** numerical simulation,  $\sigma$ -coordinate model, surge processes, surface currents, extremal level deviations.