

Академик НАН Украины В. А. Иванов, В. В. Фомин,  
член-корреспондент НАН Украины Л. В. Черкесов, Т. Я. Шульга

## Исследование сгонно-нагонных движений с учетом водообмена через Керченский пролив, вызываемых прохождением циклонов в Азовском море

*З використанням тривимірної нелінійної сигма-координатної моделі проведено вивчення впливу з урахуванням водообміну через Керченську протоку на згинно-нагінні явища і течії в Азовському морі під час циклонів. Виконано порівняння результатів чисельних експериментів для циклонів, що переміщуються по різних траєкторіях та з різними радіусами основ. Досліджено характер збуджень, які вносять циклони при переміщенні.*

Особое место в исследованиях сгонных и нагонных движений, возникающих в морских бассейнах, занимает определение катастрофических подъемов и опусканий уровня. Эта проблема актуальна прежде всего в прибрежных областях морей, связанных мелкими проливами. Как следует из материалов 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, которые влияют на водообмен между Черным и Азовским морями. В статье [2] с использованием двумерной гидродинамической модели получено решение задачи о влиянии Азовского моря и Керченского пролива на колебания уровня в Черном море, вызываемые прохождением циклонов. Исследованию особенностей динамики вод Азовского бассейна без учета Керченского пролива посвящено сообщение [3], где с помощью трехмерной нелинейной  $\sigma$ -координатной модели [4] изучено влияние параметров циклонических образований на сгонно-нагонные движения.

В данном сообщении 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, их траекторий и Керченского пролива на сгонно-нагонные движения.

1. В качестве исходных принимаются нелинейные уравнения движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [4]. На свободной поверхности удовлетворяются кинематическое и динамические условия. На дне ( $z = -H(x, y)$ ) нормальная составляющая скорости равна нулю. Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [4]; на твердых боковых границах выполняется условие прилипания. При решении задачи с учетом пролива на жидкой границе ( $\Omega$ ) принимается условие свободного протекания (равенство нулю первой производной нормальной составляющей скорости к жидкой границе  $U'_n|_{\Omega} = 0$ ). В начальный момент времени движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна, циклон находится за пределами акватории.

Циклон моделируем в виде движущейся с постоянной скоростью области возмущений атмосферного давления:

$$p_a = \begin{cases} -p_0 \cos^2 \frac{\pi r}{2R_c} + \tilde{p}_a, & r \leq R_c, \\ \tilde{p}_a, & r > R_c, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\tilde{p}_a$  — фоновое значение давления;  $p_0$  — максимальное отклонение от  $\tilde{p}_a$  в атмосферном возмущении;  $r = \sqrt{(x_0(t) - x)^2 + (y_0(t) - y)^2}$  — расстояние от центра  $(x_0(t), y_0(t))$  движущегося циклона до точки с координатами  $x, y$ .

Для нахождения вектора горизонтальной скорости ветра ( $\mathbf{W}$ ) в приводном слое воспользуемся соотношением работ [5, 6] для скорости гециклострофического ветра в циклоне. Считая, что барическое образование движется поступательно со скоростью  $\mathbf{c}$ , получаем выражение для скорости приводного ветра:

$$\mathbf{W} = \begin{cases} \mu W_g \hat{T}(90^\circ + \gamma) \frac{\mathbf{r}}{R} + \mathbf{c}, & r \leq R_c, \\ 0, & r > R_c. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $W_g = -fr/2 + [(fr^2/2) + (p_a)_r r / \rho_a]^{1/2}$  — гециклострофическая скорость;  $\gamma = 20^\circ$  — угол отклонения направления ветра от касательных к изобарам;  $(p_a)_r$  — радиальный градиент атмосферного давления; вектор  $\mathbf{r}$  направлен от центра циклона к точке, в которой вычисляется  $\mathbf{W}$ ;  $\hat{T}(\alpha)$  — матрица поворота на угол  $\alpha$  ( $\alpha = 90^\circ + \gamma$ ).

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

$$G(t_n) = S \sum_{i=1}^n \overline{\mathbf{U}(t_i)} \Delta t_i, \quad (3)$$

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

В исходных уравнениях, граничных и начальных условиях осуществляется переход от координаты  $z$  к координате  $\sigma$  [4]. Численный алгоритм решения по времени базируется на применении двухслойных разностных схем. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости Куранта для баротропных волн [4]. Рельеф дна и конфигурация береговой линии Азовского моря в узлах сетки сняты с навигационных карт.

**2.** Над Азовским морем и его побережьем отмечаются штормовые циклоны, которые приводят к катастрофическим спадам и подъемам уровня. Они перемещаются в район Азовского моря в течение всего года, но чаще — зимой и весной. Наиболее часто они приходят из западных районов Черного моря и центральных районов Европы (западные циклоны), а также из Средиземного моря и Малой Азии (южные циклоны) [1, 7]. На основании анализа материалов контактных и спутниковых наблюдений в районах Черного и Азовского морей [7] получены осредненные характеристики циклонов за два года. Средние скорости поступательного перемещения циклонов составляют 5–10 м/с, характерный диаметр области атмосферных образований составляет 500–700 км, перепад давления между центром и периферией 11–21 гПа.

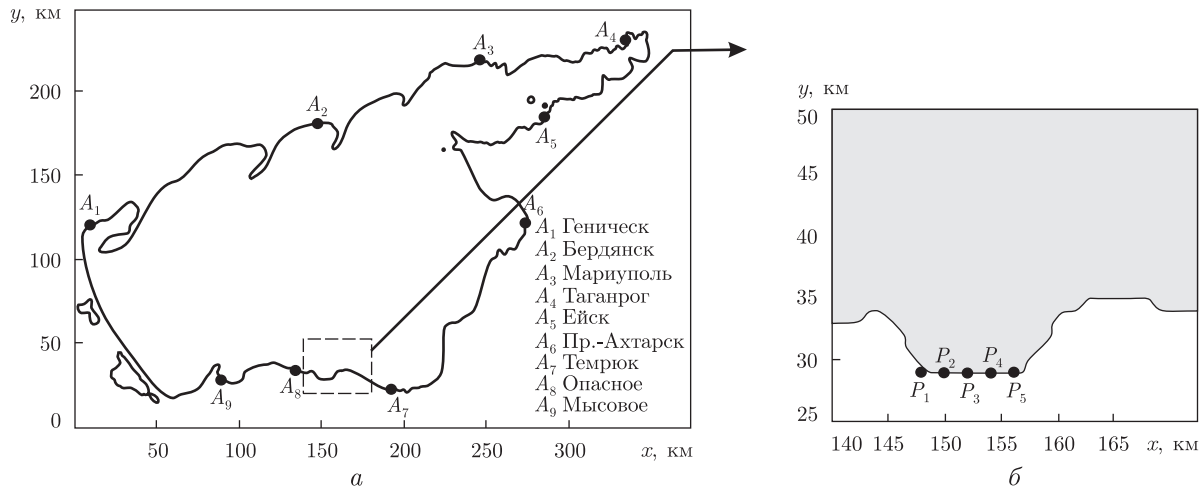


Рис. 1. Положение прибрежных станций ( $A_1$ – $A_9$ ) вдоль побережья Азовского моря ( $a$ ) и расположение расчетных точек (пунктов) на границе пролива ( $b$ )

Для численного моделирования динамических процессов в Азовском море выбраны южные и западные циклоны, направления передвижения которых составляют с осью  $x$  углы  $90^\circ$  и  $0^\circ$  соответственно. Скорости их движения ( $c$ ) принимаем равными 5 м/с, максимальные отклонения ( $p_0$ ) от фонового значения давления — равными 15 гПа. Расчеты проведены для трех значений радиусов барических образований ( $R_c^i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ) 100, 200, 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 проводили в пяти точках ( $P_1$ – $P_5$ ), равномерно расположенных на свободной поверхности (см. рис. 1,  $b$ ). На основании реальной батиметрии средняя глубина сечения пролива составляет 4 м, ширина 10 км.

Из анализа результатов расчетов следует, что поступательное перемещение атмосферных образований с одинаковой скоростью и различными радиусами оснований генерирует поля приводного ветра, максимумы скоростей которых ( $\mathbf{W}_{\max}$ ) составляют, м/с: 21,3 ( $R_c^1 = 100$  км); 19,5 ( $R_c^2 = 200$  км); 16,5 ( $R_c^3 = 400$  км). Время, в течение которого циклон движется по поверхности моря ( $t = t_k$ ), неодинаково и зависит от величины радиуса основания: 25 ч при  $R_c = R_c^1$ ; 36 ч при  $R_c = R_c^2$ ; 58 ч при  $R_c = R_c^3$ . Расчетный период для всех циклонов равен 168 ч (7 сут). Отсюда видно, что при прохождении циклонов в 2 и 4 раза больших размеров, промежуток времени нахождения их над акваторией увеличивается в 1,4 и 2,3 раза соответственно. При этом максимальная скорость приводного ветра уменьшается на 8,6 и 22,7%.

На рис. 2 представлены поля уровня Азовского моря, генерируемые прохождением южного циклона со скоростью 5 м/с и радиусом основания 100 км, полученные в результате моделирования. Из анализа рассчитанных полей следует, что через 1 ч после вхождения циклона в акваторию моря вдоль южного побережья имеет место изменение уровня, симметричное относительно входа в пролив. В это время ( $t = 1$  ч) у северо-восточного и северо-западного берегов возмущений нет. Узловая линия пересекает центральную часть моря

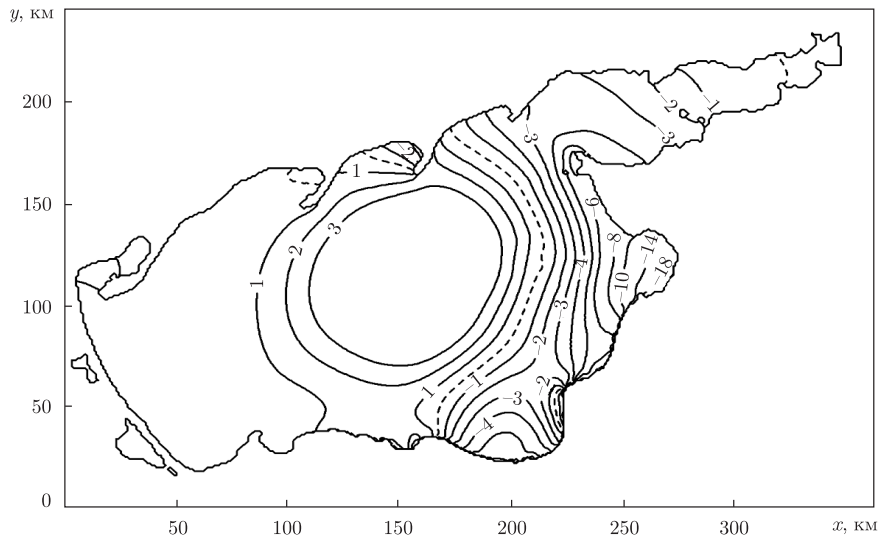


Рис. 2. Поля уровня Азовского моря с учетом водообмена через пролив, генерируемые прохождением южного циклона со скоростью 5 м/с и радиусом 100 км, в момент пересечения центром циклона центрального района моря ( $t = 8$  ч)

и ориентирована по направлению перемещения циклона. Через 8 ч после начала действия циклона (см. рис. 2) 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 вдоль траектории циклона. В западной части наблюдается повышение, а в восточной — понижение уровня. С уходом циклона изолинии уровня перестают быть замкнутыми, а узловая линия также ориентирована вдоль траектории циклона. В Таганрогском заливе отмечается сгущение изолиний уровня и его подъем, в восточной части — его понижение. Спустя 12 ч после ухода циклона с акватории моря узловая линия ( $t = 36$  ч) ориентирована перпендикулярно траектории перемещения циклона. Южное побережье моря при этом становится зоной сгонов, северное — зоной нагонов.

Проанализируем особенности пространственного распределения полей средних по вертикали скоростей течений с учетом водообмена через пролив, вызываемые действием циклона с такими же параметрами и в те же моменты времени ( $t = 1$  ч;  $t = 8$  ч;  $t = 24$  ч и  $t = 36$  ч). На первом этапе перемещения ( $t = 1$  ч) направление течений в значительной степени повторяет характер полей скорости приводного ветра. Структура и направление течений, спустя 8 ч (рис. 3), изменяются. В центральной части бассейна имеет место антициклонический вихрь, в восточных и западных районах моря течения направлены перпендикулярно к траектории передвижения циклона. Через 24 ч, когда циклон уходит с акватории, в большей части Азовского моря и в Таганрогском заливе преобладает западное направление течений, в центральной части сохраняется антициклоническая структура. Через 12 ч после ухода циклона с акватории ( $t = 36$  ч) отмечаются поля течений более сложного характера. В западной и центральной частях моря наблюдается несколько вихревых образований, между которыми проходит область течений, направленных в сторону пролива. В восточной части течения ориентированы на запад.

Максимальные значения нагонов и сгонов на станциях  $A_1$ – $A_9$  приведены в табл. 1. Нагоны и сгоны вызываются южными циклонами, перемещающимися со скоростью 5 м/с, с радиусами 100, 200 и 400 км. Рассмотрены случаи наличия и отсутствия пролива. Как сле-

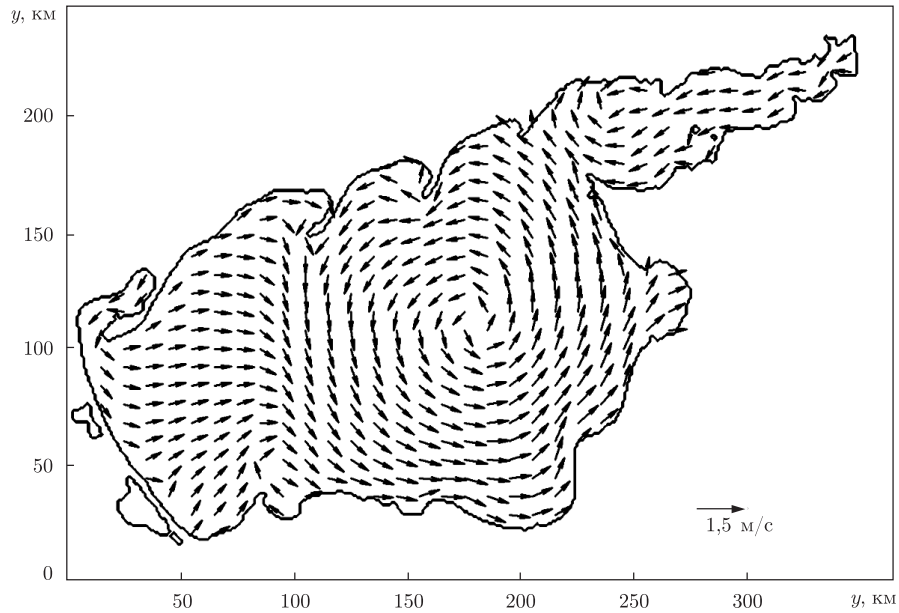


Рис. 3. Поля средних по вертикали скоростей течений в Азовском море с учетом водообмена через пролив, генерируемые прохождением южного циклона со скоростью 5 м/с и радиусом 100 км, в момент пересечения центром циклона центрального района моря ( $t = 8$  ч)

дует из анализа данных, приведенных в табл. 1, для различных параметров возмущающих циклонических образований и для всех указанных станций наибольшие по абсолютной величине отклонения уровня имеют место при учете водообмена через пролив. Из верхней части

Таблица 1. Максимальные ( $|\zeta|_{\max}$ , см) нагоны и сгоны на береговых станциях Азовского моря, вызываемые прохождением южных циклонов со скоростью 5 м/с, для трех значений их радиусов с учетом и без учета пролива

Береговые станции	$R_c^1 = 100$ км		$R_c^2 = 200$ км		$R_c^3 = 400$ км	
	$U_n _{\Omega} = 0$	$U'_n _{\Omega} = 0$	$U_n _{\Omega} = 0$	$U'_n _{\Omega} = 0$	$U_n _{\Omega} = 0$	$U'_n _{\Omega} = 0$
Геническ	10	11	12	15	12	19
Бердянск	8	10	11	16	10	13
Мариуполь	39	46	59	68	70	79
Таганрог	49	54	93	97	102	115
Ейск	34	48	58	64	62	70
Приморско-Ахтарск	35	47	57	66	32	37
Темрюк	11	8	19	10	9	15
Опасное	5	7	8	9	10	12
Мысовое	6	10	8	12	18	19
Геническ	13	22	12	18	36	43
Бердянск	2	3	5	8	3	4
Мариуполь	12	7	15	11	22	17
Таганрог	19	21	27	47	60	63
Ейск	45	48	48	53	39	44
Приморско-Ахтарск	44	46	45	52	30	34
Темрюк	9	13	12	19	26	19
Опасное	8	12	12	16	27	22
Мысовое	10	15	10	17	31	33

табл. 1, в которой приведены значения нагонов, видно, что максимальные нагоны отмечены в районе г. Таганрог. Для рассматриваемых значений радиусов циклонов, а также в зависимости от граничных условий в проливе на этой станции они составляют соответственно: 49 и 54 см при  $R_c^1$ ; 93 и 97 см при  $R_c^2$ ; 102 и 115 см при  $R_c^3$ . Отсюда видно, что разница величин нагонов, рассчитанных с учетом и без учета пролива, не превышает 12%. Минимальные нагоны прослеживаются в пос. Опасное и в зависимости от расчетов с учетом и без учета пролива соответственно равны: 5 и 7 см при  $R_c^1$ ; 8 и 9 см при  $R_c^2$ ; 10 и 12 см при  $R_c^3$ . При этом время достижения наибольших подъемов уровня с учетом пролива увеличивается не более чем на 7%.

В нижней части табл. 1 даны максимальные величины сгонов в тех же пунктах. Видно, что под действием циклонов наибольшие сгоны имеют место в г. Ейск. С учетом и без учета водообмена через пролив они составляют: 45 и 48 см при  $R_c^1$ ; 48 и 53 см при  $R_c^2$ ; 39 и 44 см при  $R_c^3$ . Изменения максимальных величин сгонов в районе г. Ейск с учетом и без учета водообмена через пролив для  $R_c^1$ ,  $R_c^2$  и  $R_c^3$  соответственно равны 6, 15 и 11%. Как и для нагонов, с увеличением радиуса основания циклона уменьшается время достижения максимумов сгонов. Анализ результатов, приведенных в табл. 1, позволяет сделать вывод о том, что на рассматриваемых станциях при увеличении размеров циклонов в 2 раза ( $R_c^2 = 2R_c^1$ ) максимумы сгонов и нагонов возрастают не более чем в 2,3 раза. При увеличении размера циклона в 4 раза ( $R_c^3 = 4R_c^1$ ) рост наибольших значений сгонов и нагонов не превышает 3 раз. Учет водообмена через пролив приводит к изменению экстремальных отклонений уровня, которые не превышают 40%. Период времени достижения экстремальных значений уровня уменьшается с увеличением размеров действующих циклонов.

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

Полученные при моделировании расчетные данные показывают, что наибольший расход воды ( $53,6 \text{ м}^3$ ) через пролив отмечается для циклона самого большого радиуса (400 км), наименьший ( $12,7 \text{ м}^3$ ) — для циклона с минимальным радиусом (100 км). Нарастание расхода до максимума происходит от начального момента времени до момента, когда центр циклона проходит центральную часть моря. После ухода циклона с акватории моря расход уменьшается до нуля, затем принимает отрицательные значения, вызванные оттоком воды через пролив.

Исследования максимальных значений средних по глубине скоростей течений, генерируемых южными циклонами ( $c = 5 \text{ м/с}$ ), в зависимости от величины их радиусов проведены в пяти пунктах пролива (см. рис. 1). Из анализа этих данных следует, что уменьшение размеров циклонов приводит к увеличению максимальных скоростей течений в проливе. При этом наибольшие значения максимумов скоростей течений достигаются в центре пролива (пункт  $P_3$ ) и составляют, м/с: 0,33 ( $R_c^1$ ); 0,29 ( $R_c^2$ ); 0,21 ( $R_c^3$ ). Наименьшие значения максимальных скоростей (м/с) течений наблюдаются в пункте, расположенном у западной границы пролива ( $P_1$ ): 0,23 ( $R_c^1$ ); 0,19 ( $R_c^2$ ); 0,14 ( $R_c^3$ ). Отсюда следует, что при одних и тех же размерах циклонов в пунктах центральной части пролива возникают течения, максимальные скорости которых превышают в 1,5 раза максимальные скорости течений на его границе. При увеличении радиусов циклонов 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.

Оценим влияние на сгонно-нагонные процессы изменение траектории передвижения циклонов с теми же основными параметрами. Моделирование штормовой ситуации [1, 7] проведем для циклонов, перемещающихся с запада на восток, с учетом и без учета водообмена через пролив.

Из сравнения результатов моделирования для двух направлений движения циклонов следует, что южные циклоны приводят к возникновению больших нагонов и сгонов. При этом максимальные отклонения уровня в прибрежной зоне, вызываемые циклонами разных направлений, не превышают 40%. Время достижения этих максимумов под действием западных циклонов незначительно увеличивается (менее чем на 14%) по сравнению с действием южных циклонов. 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 южными циклонами.

1. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 3. Азовское море.* – Ленинград: Гидрометеоиздат, 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 // *Мор. гидрофиз. журн.* – 2000. – № 5. – С. 5–14.
3. *Иванов В. А., Фомин В. В., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Исследование сгонно-нагонных явлений в Азовском море, вызванных атмосферными возмущениями // *Доп. НАН України.* – 2006. – № 11. – С. 109–113.
4. *Фомин В. В., Черкесов Л. В.* Моделирование дрейфовых течений в мелководном бассейне с учетом изменения касательных напряжений, вызванных ветровыми волнами // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана.* – 2006. – 42, № 3. – С. 362–370.
5. *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 // *Мор. гидрофиз. журн.* – 2005. – № 1. – С. 42–54.
6. *Григоркина Р. Г., Фукс В. Р.* Воздействие тайфунов на океан. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. – 244 с.
7. *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 // *Исследования Земли из космоса.* – 1991. – № 3. – С. 89–95.

*Морской гидрофизический институт  
НАН Украины, Севастополь*

*Поступило в редакцию 06.06.2008*

Academician of the NAS of Ukraine **V. A. Ivanov, V. V. Fomin,**  
Corresponding Member of the NAS of Ukraine **L. V. Cherkesov, T. Ya. Shul'ga**

### **Study of the influence of water exchange through the Kerch strait on the surge phenomena in the Sea of Azov in the presence of cyclones**

*The investigation of the influence of water exchange through the Kerch strait on the surge phenomena and currents in the Sea of Azov in the presence of cyclones is carried out, by using a three-dimensional nonlinear sigma-coordinate model. The comparison of the results of numerical experiments for cyclones moving along different trajectories and with the different base radii is performed. The character of the disturbances caused by a moving cyclone is studied.*