

В.А.Иванов, Л.В.Черкесов, Т.Я.Шульга

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь***ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЙ, СГОННО-НАГОННЫХ ПРОЦЕССОВ,
И ЭВОЛЮЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ, ВЫЗВАННЫХ
ДЕЙСТВИЕМ НЕСТАЦИОНАРНОГО ВЕТРА В АЗОВСКОМ МОРЕ**

Изучаются течения и волны, возникающие в Азовском море под действием полей ветра: постоянного, меняющегося со временем, полученного с применением данных ре-анализа модели SKIRON и являющегося результатом их совместного действия. При этом для исследования волн, течений и трансформации пассивной примеси применяется нелинейная трехмерная σ -координатная модель. Найдены зависимости величин сгонов и нагонов, а также характеристик трансформации областей загрязнения на различных горизонтах от интенсивности действующего ветра и скоростей стационарных течений. Проведено сравнение результатов численных расчетов с данными натурных наблюдений, полученными во время действия нестационарного ветра на ряде гидрологических станций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *нелинейная трехмерная модель, стационарные течения, волны, сгоны, нагоны, трансформации пассивной примеси.*

Последствия промышленной и сельскохозяйственной деятельности в Азово-Черноморском регионе оказывают заметное негативное воздействие на морскую среду. В связи с этим возникает необходимость проведения научных исследований, ставящих своей целью оценить последствия этого влияния и нахождение путей его существенного уменьшения. Одним из направлений таких исследований является анализ волн [1, 2], течений, сгонно-нагонных процессов и связанного с ними распространения загрязнений в прибрежных районах Азовского моря.

Изучение течений и колебаний уровня, возникающих в этом море под действием переменного по времени ветра и атмосферного давления при отсутствии стационарных течений, выполнено в [3, 4]. Целью данной работы является исследование влияния стационарных течений на сгонно-нагонные явления и трансформацию пассивной примеси, вызываемые действием ветра, приповерхностные поля которого рассчитываются методом ре-анализа (SKIRON) [5]. Ставится задача – найти оценки изменений величин скоростей течений, уровня моря и характеристик областей загрязнения при наличии и отсутствии стационарных течений. Для построения численного алгоритма использована модель POM (Princeton Ocean Model) [6–8], адаптированная к условиям бассейна Азовского моря.

Постановка задачи. Рассмотрим прямоугольную систему координат, в которой ось x направлена на восток, y – на север, z – вертикально вверх. Математическая модель основывается на уравнениях движения и неразрывности с использованием приближения гидростатики [2, 8]. При этом u, v, w – проекции скорости по осям x, y, z ; t – время; p – давление; ρ – плотность; g – ускорение свободного падения; f – параметр Кориолиса.

Коэффициент горизонтальной вязкости A_M вычисляется с использованием
© В.А.Иванов, Л.В.Черкесов, Т.Я.Шульга, 2014

нием модели подсеточной вязкости Смагоринского [9] в зависимости от горизонтальных градиентов скорости:

$$A_M = \frac{1}{2} C_M \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2}, \quad (1)$$

где C_M – эмпирическая константа.

Соотношения для расчета коэффициентов вертикальной вязкости K_M и турбулентной диффузии K_H в соответствии с полуэмпирической моделью Меллора-Ямады уровня 2.5 [10] имеют вид:

$$K_M = q l S_M, \quad K_H = q l S_H, \quad (2)$$

где S_M и S_H в нейтрально стратифицированном потоке равны 0,30 и 0,49 соответственно. Данная параметризация основана на решении двух дополнительных уравнений в частных производных для определения кинетической энергии турбулентности ($q^2/2$) и макромасштаба турбулентности (l):

$$\frac{dq^2}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_q \frac{\partial q^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_q \frac{\partial q^2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) + 2 \left[P_s - \frac{q^3}{B_1 l} \right], \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dq^2 l}{dt} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_q \frac{\partial q^2 l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_q \frac{\partial q^2 l}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_q \frac{\partial q^2 l}{\partial z} \right) + \\ & + l E_1 P_s + l E_1 E_3 \frac{g}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{1}{v_s^2} \frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{q^3}{B_1} \left(1 + E_2 \left(\frac{l}{kL} \right)^2 \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $P_s = q l S_z \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right)$ – скорость генерации турбулентности за счет

вертикального сдвига скорости течения, коэффициент S_z связан с числом Ричардсона соотношением

$$S_z = \frac{A_2 (1 - 6 A_1 / A_2)}{1 - (3 A_2 B_2 + 18 A_1 A_2) G_H}, \quad G_H = - \frac{l^2}{q^2} \frac{g}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{1}{v_s^2} \frac{\partial p}{\partial z} \right),$$

v_s – скорость звука; $L = (\zeta - z)^{-1} + (H - z)^{-1}$; $\varepsilon_q = 0.2$; $k = 0.4$ – постоянная Кармана; значения эмпирических постоянных $A_1 = 0.92$, $A_2 = 0.74$, $B_1 = 16.6$, $B_2 = 10.1$, $C_1 = 0.08$, $E_1 = 1.33$, $E_2 = 0.025$ [11].

В соответствии с [10], для решения уравнений (3) – (4) поставлены граничные условия

$$q^2 \Big|_{z=\zeta} = B_1^{3/2} u_0^2, \quad l \Big|_{z=\zeta} = 0; \quad q^2 \Big|_{z=-H} = B_1^{3/2} u_b^2, \quad l \Big|_{z=-H} = 0. \quad (5)$$

Здесь u_0 и u_b – скорости в поверхностном и придонном слоях соответственно. Для уравнений движения граничные условия на свободной поверхности ($z = \zeta(x, y, t)$) имеют вид:

$$w \Big|_{z=\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=\zeta} = (\tau_{0x}, \tau_{0y}). \quad (6)$$

При этом $\tau_{0x} = C_a W_x |\mathbf{W}|$ и $\tau_{0y} = C_a W_y |\mathbf{W}|$ – проекции касательных напряжений ветра [8]; $\mathbf{W} = (W_x, W_y)$ – вектор скорости ветра на высоте 10 м

над уровнем моря; C_a – эмпирический коэффициент поверхностного трения [12], который варьируется в зависимости от величины скорости ветра:

$$10^3 C_a = \begin{cases} 2,5; & |\mathbf{W}| > 22 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \\ 0,49 + 0,065|\mathbf{W}|; & 8 \leq |\mathbf{W}| \leq 22 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \\ 1,2; & 4 \leq |\mathbf{W}| \leq 8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \\ 1,1; & 1 \leq |\mathbf{W}| \leq 4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \\ 0,6; & |\mathbf{W}| \leq 1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}. \end{cases} \quad (7)$$

На дне ($z = -H(x, y)$) равна нулю нормальная составляющая скорости, придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [8]:

$$\left(w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) \Big|_{z=-H} = 0, \quad K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H} = (\tau_{1x}, \tau_{1y}), \quad (8)$$

где $\tau_{1x} = C_b u \sqrt{u^2 + v^2}$, $\tau_{1y} = C_b v \sqrt{u^2 + v^2}$; C_b – коэффициент донного трения, который находится по формуле $C_b = k^2 / (\ln^2 h_b / z_0)$, где h_b – шаг по вертикали в придонном слое; $z_0 = 0,03$ мм – параметр шероховатости, характеризующий гидродинамические свойства подстилающей донной поверхности. На боковых границах выполняются условия прилипания.

В качестве начальных условий ($t = 0$) принимаем отсутствие движения жидкости и колебаний свободной поверхности до начала действия атмосферных возмущений:

$$u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \quad w(x, y, z, 0) = 0, \quad \zeta(x, y, z, 0) = 0. \quad (9)$$

Для расчета распространения примеси концентрации $C(x, y, z, t)$ используем уравнение переноса и диффузии [8]

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right). \quad (10)$$

Здесь $A_H = 10 \text{ м}^2/\text{с}$ [4, 6] – коэффициент горизонтальной и K_H – вертикальной турбулентной диффузии, при этом K_H рассчитывается по формуле (2). На свободной поверхности и в придонном слое к динамическим граничным условиям добавляются условия отсутствия потоков примеси через свободную поверхность, боковые стенки (S) и дно бассейна [8]:

$$\left(K_H \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} \right) \Big|_{z=\zeta} = 0, \quad \left(A_H \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} \right) \Big|_S = 0, \quad \left(K_H \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} \right) \Big|_{z=-H} = 0. \quad (11)$$

Начальная область загрязнения для всех рассматриваемых далее видов атмосферных возмущений расположена в поверхностном слое:

$$C_0(x, y, z) = \begin{cases} 1, & r \leq R, \quad 0 \geq z \geq -z_1, \\ 0, & r > R, \quad z < 0; \quad r \leq R, \quad z < -z_1, \end{cases} \quad (12)$$

где z_1 – толщина слоя области загрязнения; R – ее радиус, $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$ – расстояние от центра этой области (x_0, y_0) до точки, в которой вычисляется концентрация. В качестве параметров, характеризующих эволюцию пассив-

ной примеси, выбраны: время рассеивания примеси (t_d) и коэффициент максимальной площади ее распространения на различных горизонтах ($K_{\max}$). При этом $K_{\max} = S_{\max}/S_0$, где S_0 – площадь области начального загрязнения в поверхностном слое, $S_{\max}$ – наибольшее значение площади загрязнения на рассматриваемом горизонте в процессе трансформации примеси. Условием полного рассеивания загрязнения принимается величина концентрации, не превышающая $2,5 \cdot 10^{-2}$ во всей акватории моря ($C_d = 2,5 \cdot 10^{-2}$).

Для численной реализации выполняется переход от координаты z к σ -координате [6 – 8]. В этом случае алгоритм решения базируется на применении двухслойных разностных схем. Операторы переноса аппроксимируются [13] с помощью TVD-схемы (линейная комбинация схемы направленных разностей и схемы Лакса-Вендроффа), пространственная дискретизация уравнений выполняется на сетке C . Используются равномерные шаги по горизонтальным координатам Δx , Δy и по σ -координате.

Разрешение модели по широте и долготе составляет $(1/59)^\circ \times (1/84)^\circ$, при котором линейные размеры ячейки $\Delta x = \Delta y = 1,4$ км, количество узлов горизонтальной сетки равно 276×176 . Число расчетных уровней σ по вертикали – 11. Уравнения интегрировались с шагом $\Delta t = 18$ с для определения осредненных двумерных компонент скорости и уровня моря и $\Delta t_A = 10\Delta t = 3$ мин – для вычисления отклонений от найденных средних и вертикальной компоненты скорости. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости для баротропных волн [14].

Топография дна на модельную сетку интерполирована с использованием массива глубин, приведенного в навигационных картах. Отклонения уровня Азовского моря анализируются на девяти станциях, расположенных вблизи крупных населенных пунктов.

Анализ результатов численных экспериментов. Стационарные движения в Азовском море генерируются полем западного ветра, скорость которого ($|\mathbf{W}|^{st}_{1,2} = 5, 10$ м/с) на поверхности моря не зависит от x и y , по времени первые три часа ($0 < t \leq 3$ ч) нарастает со временем по линейному закону ($|\mathbf{W}|^{st}_{1,2} = 0$ при $t = 0$), достигает наибольшего значения и далее ($t \geq 3$ ч) не меняется. Момент выхода течений на установившийся режим ($t = t_0$) определяется тем, что между двумя соседними значениями времени ($t_k > t_0$ и $t_k + \Delta t$) не происходит заметных изменений отклонений уровня и скоростей течений (изменения не превышают 3 %). Исходя из этого, находим время установления движения жидкости ($t = t_{01}, \mathbf{W}^{st}_1; t = t_{02}, \mathbf{W}^{st}_2$).

В момент установления движения жидкости ($t = t_0$) к стационарному ветру ($\mathbf{W}^{st}_{1,2}$) присоединяется неоднородное по пространству и времени поле ветра, полученное по данным ре-анализа ($\mathbf{W}_{SKIRON}$). При $t > t_0$ $\mathbf{W}^{st}_{1,2}$ поддерживает стационарное движение, а $\mathbf{W}_{SKIRON}$ – добавляет к нему нестационарную составляющую.

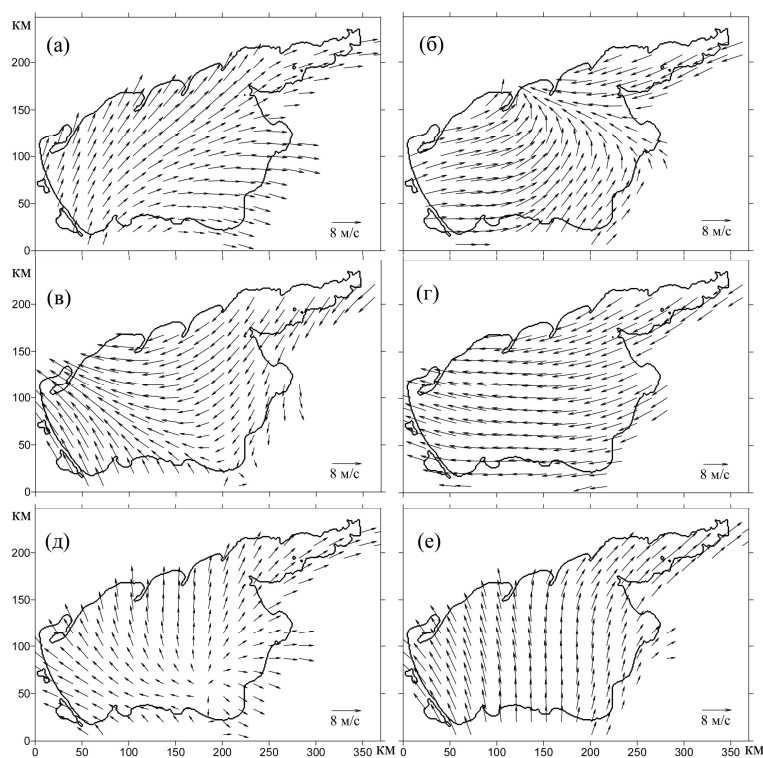
В серии численных экспериментов изучается влияние совместного действия стационарного ($\mathbf{W}^{st}_{1,2}$) и переменного ($\mathbf{W}_{SKIRON}$) ветра на максимальные скорости течений и экстремальные значения стонов и нагонов. Эти результаты сравниваются с данными, полученными при расчете волн и течений, вызванных действием только постоянного ветра или только ветра, оп-

ределенного по данным ре-анализа.

Исследование установившихся течений выполняется для постоянного западного ветра, скорость которого равна 5 и 10 м/с ($|\mathbf{W}|_{1,2}^{st} = 5, 10$ м/с). В качестве переменного по времени и неоднородного по пространству используются поля приводного ветра модели SKIRON [5] за период с 8 по 18 сентября 2007 г. Его действие при наличии стационарных течений в Азовском море происходит в течение 10-ти суток, начиная с 0 ч 8 сентября.

Анализ информации о характерных условиях погоды для района Азовского моря свидетельствует о том, что в теплый период года (апрель – октябрь) имеет место антициклонический тип со скоростями ветра не более 8 м/с. При этом Азовское море оказывается в тыловой части антициклона, смещающегося с запада на восток. В это время преобладают восточные и северо-восточные ветры.

На рис.1 представлены векторные поля ветра модели SKIRON над Азовским морем, которые соответствуют экстремальным значениям его скорости или резким переменам направления. Первая экстремальная ситуация возникает через 36 ч (рис.1, а). В этом случае над южной частью моря отмечается антициклоническое воздействие, а в его северной части скорость ветра достигает на отдельных участках 10 м/с. Через 68 ч ($t = t_0 + 68$ ч) со скоростью 15 – 20 м/с перемещаются два небольших циклона (рис.1, б), которые формируются в восточной и западной частях моря. Следующие макси-



Р и с . 1 . Поля ветра, полученные по данным ре-анализа модели SKIRON в различные моменты времени от 0 ч 11 сентября 2007 г.: 36 ч (а), 68 ч (б); 90 ч (в); 140 ч (г); 152 ч (д); 168 ч (е).

Т а б л и ц а 1. Максимальные скорости ветра как функции времени, полученные по данным модели SKIRON с 0.00 11 сентября до 24.00 18 сентября 2007 г.

время, ч	скорость ветра, м/с	направление ветра, °
2	6,8	107
14	2,6	344
28	5,8	9
30	3,0	10
32	5,2	107
44	5,8	344
48	8,1	100
50	4,2	213
54	5,8	195
56	7,9	192
58	9,6	108
62	11,6	350
76	9,4	354
92	12,7	350
104	9,6	100
106	7,5	210
108	5,7	200
112	3,5	110
124	5,2	344
130	3,3	354
132	1,6	347
140	2,1	10
152	4,9	106
192	5,8	200

неустановившихся течений, вызванных действием $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$. Выполнено сравнение результатов моделирования, полученных при различных скоростях постоянного ветра и при его отсутствии.

В табл.2 даны максимальные величины ($|\mathbf{U}|_{\text{max}}$) скоростей стационарных течений, вызванных постоянным ветром $\mathbf{W}_{1,2}^{\text{st}}$, а также наибольшие значения скоростей нестационарных течений, генерируемых только ветром $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ и их совместным действием $\mathbf{W}_{1,2}^{\text{st}} + \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$. Здесь же указаны координаты максимальных величин скоростей и время их достижения на различных глубинах. Из анализа этих данных следует, что при наличии стационарных течений увеличиваются скорости нестационарных течений по сравнению с их величинами при действии только ветра $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$.

мумы скоростей течений, которые соответствуют обширным циклоническим образованиям (рис.1, в, з), достигаются в 90 и 140 ч. На рис.1, д, е показаны направления полей ветра в 152 и 168 ч, соответствующие экстремумам его скорости. В дальнейшем (до 18 сентября) интенсивность ветра уменьшается.

В табл.1 представлены как функции времени величины максимальных скоростей и направлений ветра ($\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$) над Азовским морем с 11 по 18 сентября 2007 г. При этом между двумя соседними значениями времени его скорость меняется монотонно. Отклонения вектора скорости ветра от направления оси x (ось x направлена на восток под углом 50° к параллели) указаны в градусах. Отсюда видно, что за указанный период (192 ч) наибольшее и наименьшее значения максимальной скорости равны 12,7 и 1,6 м/с соответственно. Преобладающими направлениями ветра являются северо-восточное и северо-западное.

Отметим, что результаты многолетних наблюдений атмосферных возмущений в районе Азовского моря [15] для указанного периода (сентябрь) удовлетворительно согласуются с данными модели SKIRON, приведенными в этой таблице.

Численные эксперименты реализованы для двух скоростей стационарного ветра западного направления с целью исследования влияния величин возникающих при этом стационарных течений на отклонения уровня моря и поля скоростей

Т а б л и ц а 2. Максимальные значения скоростей течений (м/с) на различных глубинах Азовского моря, время их достижения ($t_{\max}$, ч, мин) и соответствующие им координаты ($x_{\max}$, $y_{\max}$)

действующий ветер	горизонт, м	$ U _{\max}$, м/с	$x_{\max}$, км	$y_{\max}$, км	$t_{\max}$, (ч, мин)
W_{11}^{st}	1	0,16	236,29	174,08	8,00
	3	0,13	236,39	173,44	8,02
	5	0,12	237,01	173,31	8,22
	10	0,08	235,34	173,00	9,44
W_{22}^{st}	1	0,49	235,38	172,19	8,35
	3	0,44	235,97	172,86	8,55
	5	0,41	237,07	171,50	9,16
	10	0,29	235,99	171,16	9,54
W_{SKIRON}	1	0,48	206,25	189,27	128,15
	3	0,46	241,76	188,88	130,10
	5	0,41	263,30	199,05	137,20
	10	0,35	238,20	175,76	145,15
$W_{11}^{st} + W_{SKIRON}$	1	0,73	201,48	106,15	130,20
	3	0,69	224,73	176,44	135,10
	5	0,61	225,31	156,78	139,15
	10	0,45	174,86	160,92	147,20
$W_{22}^{st} + W_{SKIRON}$	1	0,91	159,09	175,58	152,10
	3	0,85	199,38	159,67	154,15
	5	0,72	258,19	188,40	157,10
	10	0,65	209,66	146,44	162,20

Так, в случае $W_{11}^{st} + W_{SKIRON}$ значения $|U|_{\max}$ в 1,52; 1,50; 1,48 и 1,28 раз больше, чем для W_{SKIRON} на глубинах 1; 3; 5 и 10 м соответственно. Аналогично при $W_{22}^{st} + W_{SKIRON}$ величины $|U|_{\max}$ в 1,25; 1,23; 1,18 и 1,44 раз больше, чем для $W_{11}^{st} + W_{SKIRON}$ на этих же уровнях. При этом для всех скоростей ветра $|U|_{\max}$ монотонно убывают с ростом глубины и на каждой из них для W_{22}^{st} и W_{SKIRON} отличаются не более чем на пять процентов.

В табл. 3 приведены максимумы возвышений ($\zeta_{\max}$) и понижений ($|\zeta|_{\max}$) уровня, координаты ($x_{\max}$, $y_{\max}$) и время их достижения ($t_{\max}$) в открытой части моря для $W_{1,2}^{st}$, а также при W_{SKIRON} и $W_{1,2}^{st} + W_{SKIRON}$. Анализ данных, приведенных в этой таблице, свидетельствует о том, что для W_{22}^{st} величины $\zeta_{\max}$ и $|\zeta|_{\max}$ в 3,45 и 3,9 раз больше, чем при W_{11}^{st} .

В случае W_{SKIRON} значения $\zeta_{\max}$ и $|\zeta|_{\max}$ в 2,15 и 2,5 раза больше, чем для W_{11}^{st} , и в 1,6 и 1,5 раза меньше, чем при W_{22}^{st} . Для $W_{22}^{st} + W_{SKIRON}$ величина $\zeta_{\max}$ в 1,31, а $|\zeta|_{\max}$ в 2,1 раза больше, чем в случае $W_{11}^{st} + W_{SKIRON}$.

Таким образом, действие стационарного ветра одного направления, но большей скорости (5 и 10 м/с), при наличии W_{SKIRON} вызывает возрастание максимумов отклонений уровня ($\zeta_{\max}$ и $|\zeta|_{\max}$) на 31 и 80 % соответственно.

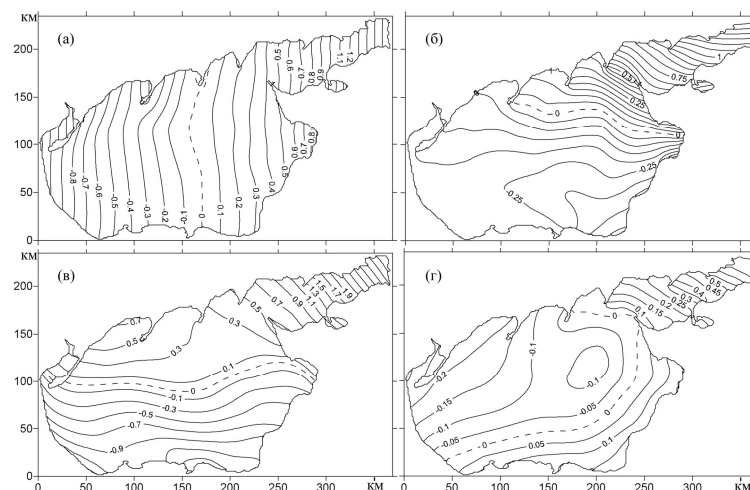
Т а б л и ц а 3. Максимальные значения отклонений уровня моря ($\zeta_{\max}$ и $|\zeta|_{\max}$, м), время их достижения ($t_{\min}$) и соответствующие им координаты (км).

действующий ветер	$\zeta_{\max}$, м	$x_{\max}$, км	$y_{\max}$, км	$t_{\max}$, ч, мин	$ \zeta _{\max}$, м	$x_{\min}$, км	$y_{\min}$, км	$t_{\min}$, ч, мин
$\mathbf{W}_{1,2}^{st}$	0,20	366,51	219,61	17,10	0,10	4,02	95,07	13,23
$\mathbf{W}_{SKIRON}$	0,69	367,86	218,27	18,46	0,39	4,02	107,13	13,47
$\mathbf{W}_{SKIRON}$	0,43	278,50	90,10	168,15	0,25	20,10	122,50	190,55
$\mathbf{W}_{1,2}^{st} + \mathbf{W}_{SKIRON}$	0,55	296,14	100,05	171,11	0,39	22,34	124,14	191,30
$\mathbf{W}_{2,2}^{st} + \mathbf{W}_{SKIRON}$	0,72	290,20	101,10	172,20	0,58	21,25	124,00	192,45

Изменения профиля поверхности моря, вызванные действием ветра, показаны на рис.2. Отсюда видно, что в установившемся режиме (рис.2, а) имеет место понижение уровня вдоль западного побережья и повышение – вдоль восточного.

Узловая (штриховая) линия пересекает центральную часть моря перпендикулярно скорости ветра. В процессе действия переменного ветра (рис.2, б – г) районы достижения наибольших и наименьших значений отклонений уровня моря меняются.

В табл.4 даны величины максимальных отклонений уровня на береговых станциях Азовского моря, вызванных стационарным ветром ($\mathbf{W}_{1,2}^{st}$), только ветром по данным ре-анализа ($\mathbf{W}_{SKIRON}$) и их совместным действием ($\mathbf{W}_{1,2}^{st} + \mathbf{W}_{SKIRON}$). В верхней части таблицы приведены значения нагонов, в нижней – сгонов. Из анализа представленных результатов расчетов следует, что наибольшие нагоны, генерируемые системой стационарного и переменного ветров ($\mathbf{W}_{1,2}^{st} + \mathbf{W}_{SKIRON}$), имеют место на станциях: Таганрог – 20,7 см ($\mathbf{W}_{1,2}^{st}$), 62,4 см ($\mathbf{W}_{2,2}^{st}$); Приморско-Ахтарск – 57,1 см ($\mathbf{W}_{SKIRON}$), 80,4 см ($\mathbf{W}_{1,2}^{st} + \mathbf{W}_{SKIRON}$); Ейск – 102,2 см ($\mathbf{W}_{2,2}^{st} + \mathbf{W}_{SKIRON}$). Отсюда видно, что максимум



Р и с . 2. Поля уровня Азовского моря в различные моменты времени: стационарный режим ($\mathbf{W}_{1,2}^{st}$, $t = 48$ ч) (а), нестационарный режим ($\mathbf{W}_{1,2}^{st} + \mathbf{W}_{SKIRON}$): 68 (б), 90 (в), 140 ч (г).

Т а б л и ц а 4. Максимальные нагоны и сгоны (см) на береговых станциях Азовского моря в стационарном режиме и вызванные прогностическим ветром при наличии стационарных течений.

береговые станции	W_{1}^{st}	W_{2}^{st}	W_{SKIRON}	$W_{1}^{st} + W_{SKIRON}$	$W_{2}^{st} + W_{SKIRON}$
<i>нагоны</i>					
Геническ	–	–	25,4	32,2	62,3
Бердянск	–	–	9,6	16,9	44,3
Мариуполь	9,8	37,3	29,3	46,4	80,4
Таганрог	20,7	62,4	50,6	63,1	89,5
Ейск	13,8	52,2	38,1	76,0	102,2
П.-Ахтарск	8,1	43,2	57,1	80,4	91,1
Темрюк	10,2	26,9	24,5	29,7	49,9
Опасное	–	–	9,4	16,1	24,8
Мысовое	7,5	13,9	12,1	19,6	34,2
<i>сгоны</i>					
Геническ	12,2	51,7	42,5	76,5	87,0
Бердянск	4,0	17,6	17,3	30,9	62,1
Мариуполь	–	–	18,2	26,0	39,7
Таганрог	–	–	29,0	42,4	72,9
Ейск	–	–	18,9	41,1	45,3
П.-Ахтарск	–	–	14,1	23,8	35,5
Темрюк	–	–	8,7	15,2	23,0
Опасное	3,3	11,1	10,6	20,5	34,2
Мысовое	–	–	22,3	39,4	63,9

нагона в случае $W_{2}^{st} + W_{SKIRON}$ (102,2 см) в 1,27 раза больше, чем для $W_{1}^{st} + W_{SKIRON}$ (80,4 см). Минимальные нагоны возникают в Мысовом – 7,5 см (W_{1}^{st}), 13,9 см (W_{2}^{st}); в Опасном – 9,4 см (W_{SKIRON}), 16,1 см ($W_{1}^{st} + W_{SKIRON}$) и 24,8 см ($W_{2}^{st} + W_{SKIRON}$).

При совместном действии переменного и постоянного ветра максимумы сгонов становятся больше, чем в установившемся режиме и в случае отсутствия стационарных течений. Для всех рассматриваемых видов ветра наибольшие сгоны имеют место в Геническе: 12,2 см (W_{1}^{st}), 51,7 см (W_{2}^{st}), 42,5 см (W_{SKIRON}), 76,5 см ($W_{1}^{st} + W_{SKIRON}$) и 87,0 см ($W_{2}^{st} + W_{SKIRON}$). Наименьшие сгоны возникают в Опасном – 3,3 см (W_{1}^{st}), 11,1 см (W_{2}^{st}) и в Темрюке – 8,7 см (W_{SKIRON}), 15,2 см ($W_{1}^{st} + W_{SKIRON}$) и 23,0 см ($W_{2}^{st} + W_{SKIRON}$).

Сравним результаты моделирования и данные натурных измерений, приведенные в таблицах ежечасных значений высот уровня моря Государственной метеорологической службы Украины за период с 8 по 18 сентября 2007 г. Оценим полученные численно экстремальные величины нагонов, вызванных ветром W_{SKIRON} , с ежечасными данными из указанных таблиц. В Геническе расчетный максимум нагона составляет 25,4 см, что на 4,7 см

(16 %) меньше, чем по данным наблюдений. В Мариуполе найденное численно наибольшее значение нагона (29,3 см) на 4,0 см (12 %) меньше измеренного. Отсюда следует, что величины амплитуд колебаний уровня, полученные по натурным данным и путем численных расчетов, достаточно хорошо совпадают. Указанные отличия, по-видимому, вызваны определенными погрешностями при измерениях и математическом моделировании.

Целью следующих численных экспериментов является оценка влияния рассматриваемых полей ветра и возникающих при этом течений на распространение пассивной примеси, поступающей в центральный район моря. Начальное положение центра области выброса примеси находится в точке с координатами $x_0 = 180$ км, $y_0 = 120$ км, где глубина моря равна 12 м. Область выброса примеси имеет вид цилиндра радиуса $R = 9$ км и глубины h_1 ($0 \geq z \geq h_1$), где h_1 (1 м) – шаг по вертикали в поверхностном слое. При этом начальное значение концентрации постоянно в данной области и равно единице ($C_0(x, y, z) = 1$).

Время выброса загрязнения в различных экспериментах не одинаково и зависит от характеристик действующего ветра. В случае стационарного ветра моменты выброса загрязнения ($t = t_{01}, \mathbf{W}^{st}_1$; $t = t_{02}, \mathbf{W}^{st}_2$) и установления движения жидкости ($t = t_{11}, \mathbf{W}^{st}_1$; $t = t_{12}, \mathbf{W}^{st}_2$) совпадают: $t_{01} = t_{11} = 38$ и $t_{02} = t_{12} = 43$ ч. При наличии только ветра $\mathbf{W}_{SKIRON}$ момент времени выброса отвечает нулю часов 11 сентября 2007 г. ($t_{03} = 72$ ч). Рассматривая совместное действие стационарного и нестационарного ветра, время выброса определяется так: $t_{04} = t_{01} + t_{03} (\mathbf{W}^{st}_1 + \mathbf{W}_{SKIRON})$ и $t_{05} = t_{02} + t_{03} (\mathbf{W}^{st}_2 + \mathbf{W}_{SKIRON})$. Для удобства анализа полученных результатов принимаем, что во всех случаях время выброса примеси равно нулю ($t_0 = 0$).

В табл.5 для трех горизонтов приведены значения коэффициента максимального распространения пассивной примеси (K_{max}), время его достижения (t_{max} , ч) и время полного рассеивания примеси (t_d , ч) для постоянного ветра ($\mathbf{W}^{st}_{1,2}$) и трех переменных ($\mathbf{W}_{SKIRON}$ и $\mathbf{W}^{st}_{1,2} + \mathbf{W}_{SKIRON}$). Из анализа приведенных данных видно, что максимум площади области загрязнения на каждом горизонте зависит от скорости ветра, приводящего к установившемуся движению.

В случае большей скорости постоянного ветра ($\mathbf{W}^{st}_2 > \mathbf{W}^{st}_1$) возрастают скорости течений (табл.2), увеличивается площадь области распространения примеси (K_{max}) и время ее полного рассеивания (t_d). Совместное действие стационарного ветра и $\mathbf{W}_{SKIRON}$ вызывает рост области загрязнения.

В этом случае наибольшая площадь загрязнения имеет место для максимального значения скорости действующего ветра ($\mathbf{W}^{st}_2 + \mathbf{W}_{SKIRON}$). При этом на свободной поверхности K_{max} равен 1,32 через 40 ч после выброса примеси, а время ее полного рассеивания (t_d) составляет 86,5 ч. Наибольшая величина площади области загрязнения на глубине $z = -H/2$ достигается спустя 42 ч после выброса примеси ($K_{max} = 1,35$), а полное рассеивание загрязнения происходит через 110 ч. В придонном слое ($z = -H + h_b$) коэффициент максимального распространения примеси принимает значение 1,38 ($t_{max} = 59$ ч). Отметим, что в рассматриваемом случае ($\mathbf{W}^{st}_2 + \mathbf{W}_{SKIRON}$) через 115 ч после выброса примеси ее концентрация во всей акватории моря не превышает 2,5 % от начального значения ($C_d = 2,5 \cdot 10^{-2}$).

Т а б л и ц а 5. Параметры ($K_{\max}$; $t_{\max}$, ч; t_d , ч) эволюции распространения примеси на различных глубинах Азовского моря при совместном действии постоянного ($W_{st_1} = 5$ м/с; $W_{st_2} = 10$ м/с) и прогностического ветра.

глубина, м	макс. значения (K , t) и t_d	W_{st_1}	W_{st_2}	W_{SKIRON}	W_{st_1} + W_{SKIRON}	W_{st_2} + W_{SKIRON}
$z = 0$	$K_{\max}$	1,14	1,18	1,25	1,30	1,32
	$t_{\max}$, ч	5,7	4,9	31	40	40
	t_d , ч	17,3	18,2	57,1	84,5	86,5
$z = -H/2$	$K_{\max}$	1,16	1,18	1,27	1,33	1,35
	$t_{\max}$, ч	14,3	14,7	34	42	42
	t_d , ч	36,7	37,6	104	106	110
$z = -H + h_d$	$K_{\max}$	1,16	1,19	1,33	1,37	1,38
	$t_{\max}$, ч	26,9	25,5	55	58	59
	t_d , ч	53,4	55,2	108	110	115

Основные выводы. В работе представлены результаты исследования сгонно-нагонных явлений и эволюции пассивной примеси системой течений, вызванных действием постоянного и переменного ветра в Азовском море. Достоверность этих результатов подтверждается сравнением рассчитанных значений экстремальных сгонов и нагонов с данными натурных наблюдений, полученными во время действия приводного ветра по модели SKIRON на береговых гидрометеорологических станциях. Найденные при этом результаты приведены в таблицах величин сгонов, нагонов и скоростей течений для различных характеристик постоянного и переменного ветра. Выполнен также анализ влияния скорости ветра и возникающих при этом течений на характеристики процесса трансформации пассивной примеси.

Анализ результатов моделирования динамических процессов в Азовском море позволил получить следующие выводы:

- при исследовании стационарных движений установлено, что под действием постоянного ветра в 2 раза большей скорости (5 и 10 м/с) максимальные отклонения уровня моря увеличиваются в 3,45 раза (0,2 и 0,69 см) минимальные – в 3,9 раза (0,1 и 0,39 см); максимальные скорости установившихся течений возрастают в 12 раз (0,16 и 1,17 м/с);

- увеличение максимальной скорости ветра приводит к росту объема области загрязнения, наименьшая площадь загрязнения имеет место при отсутствии ветра;

- время достижения максимального объема области загрязнения уменьшается с увеличением скорости ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. – М.: Наука, 1977. – 815 с.
2. Черкесов Л.В., Иванов В.А., Хартиев С.М. Введение в гидродинамику и теорию волн. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 264 с.
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., Шульга Т.Я.* Исследование волн и течений, возникающих под действием ветра в Азовском море // Доп. НАН України.– 2006.– № 12.– С.110-115.
5. <http://forecast.uoa.gr>.
6. *Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Динамические процессы и их влияние на распространение и трансформацию загрязняющих веществ в ограниченных морских бассейнах.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– 178 с.
7. *Фомин В.В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ.– 2002.– Вып.249.– С.246-255.
8. *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.– v.4.– P.1-16.
9. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment // Mon. Weather Rev.– 1963.– v.91.– P.99-164.
10. *Mellor G.L., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys.– 1982.– v.20, № 4.– P.851-875.
11. *Rodi W.* Turbulence Models and Their Application in Hydraulics // IAHR Monograph Series.– Balkema, The Netherlands, 1993.– 116 p.
12. *Wannawong W., Humphries U.W., Wongwises P., Vongvisessomjai S.* Mathematical Modeling of Storm Surge in Three Dimensional Primitive Equations // Int. J. Comp. and Math. Sci.– 2011.– № 5.– P.44-53.
13. *Pietrzak J.* The use of TVD limiters for forward-in-time upstream-biased advection schemes in ocean modelling // Mon. Weather Rev.– 1998.– v.126.– P.812-830.
14. *Courant R., Friedrichs K.O., Lewy H.* On the partial difference equations of mathematical physics // IBM J.– 1967.– March.– P.215-234.
15. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т.III. Азовское море.*– Л.: Гидрометеиздат, 1986.– 218 с.

Матеріал поступив в редакцію 15.11.2014 г.

АНОТАЦІЯ Вивчаються течії і хвилі, що виникають в Азовському морі під дією полей вітру: постійного, мінливого з часом, отриманого із застосуванням даних ре-аналізу моделі SKIRON і є результатом їх сумісної дії. При цьому для дослідження хвиль, течій і трансформації пасивної домішки застосовується нелінійна тривимірний σ -координатна модель. Знайдені залежності величин сгонов і нагонов, а також характеристик трансформації областей забруднення на різних горизонтах від інтенсивності діючого вітру і швидкостей стаціонарних течій. Проведено порівняння результатів чисельних розрахунків з даними натурних спостережень, отриманими під час дії нестационарного вітру на ряді гідрологічних станцій.

ABSTRACT The currents and waves arising in the Sea of Azov under the influence of wind fields are studied: the stationary wind, unsteady wind of the re-analysis of the SKIRON model and wind which is result of them joint action. The nonlinear three-dimensional sigma-coordinate model has been applied for research of waves, currents and transformation of passive admixture. Dependences of surge phenomena, and also characteristics of transformation of areas of pollution on various horizons, from intensity of the wind and speeds of stationary currents are found. Comparison of results of numerical calculations with the data of natural supervision received during action of a unsteady wind at a number of hydrological stations is carried out.