

УДК 532.59

Т.Я. Шульга

Влияние интенсивности полей приводного ветра на динамические процессы и трансформацию пассивной примеси при наличии стационарных течений в Азовском море

В данной работе на основе применения нелинейной трехмерной σ -координатной модели исследуются волны и течения в Азовском море, вызываемые действием атмосферных полей, полученных по данным региональной системы прогноза SKIRON, при наличии стационарных течений. Выполнен анализ физических закономерностей распространения пассивной примеси в Азовском море с учетом ветровых воздействий различной интенсивности и стационарных течений. Установлено, что удвоение интенсивности стационарного ветра при действии с одним и тем же нестационарным ветром приводит к увеличению максимумов скоростей нестационарных течений на 64%. При двукратном увеличении или уменьшении интенсивности полей приводного ветра без учета стационарных течений генерируются течения, скорости которых отличаются не более чем на 25% по сравнению со скоростями, вызванными действием ветровых полей по данным системы SKIRON.

Ключевые слова: σ -координатная модель, динамические процессы, сгонно-нагонные процессы, стационарные течения, пассивная примесь, приводный ветер.

Введение. Изменения уровня вследствие сгонно-нагонных явлений, сопровождающиеся при сгонах – обмелением фарватеров, при нагонах – затоплением островов, берегов, разрушением портовых сооружений, имеют место, как правило, на участках у берегов с пологими подводными склонами, в заливах, узких проливах (оз. Донузлав, заливы Таганрогский, Финский, Обская губа и др.). Фактические величины сгонно-нагонных колебаний уровня Азовского моря бывают очень значительными, что приводит к возникновению опасных и катастрофических последствий. Для одного из наиболее изученных бассейнов – Азовского моря, где имеется сеть морских береговых станций и постов для анализа величин сгонов и нагонов, недостаточно проведения только стандартных специализированных экспедиционных исследований. Наиболее обоснованное представление о гидрометеорологических процессах возможно вследствие анализа расчетов, базирующихся на применении современных трехмерных численных моделей. Они позволяют учитывать реальные атмосферные воздействия, рельеф дна, конфигурацию береговой линии.

Исследование течений и колебаний уровня, возникающих в этом море под действием переменных во времени ветра и атмосферного давления при отсутствии стационарных течений, проведено в статьях [1, 2]. В этих работах для изучения динамических процессов в Азовском море применяется трех-

© Т.Я. Шульга, 2013

мерная нелинейная σ -координатная модель, которая основывается на нелинейных уравнениях движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении гидростатики. При построении численного алгоритма в этой модели используется криволинейная система координат [3 – 5].

В данной работе указанная выше математическая модель применена для исследования сгонно-нагонных явлений, течений и трансформации пассивной примеси в Азовском море, возникающих под действием переменных по пространству и времени полей приводного ветра и атмосферного давления, по метеорологическим данным прогностической системы SKIRON [6] (<http://forecast.uoa.gr>). Выполнено сравнение результатов проведенных численных расчетов с данными натурных наблюдений, полученными во время действия этого ветра на ряде гидрологических станций. Найдены зависимости величин сгонов и нагонов, скоростей течений и характеристик эволюции областей загрязнения на различных горизонтах от интенсивности прогностического ветра и стационарных течений.

Постановка задачи. Граничные и начальные условия. Введем систему координат, в которой ось x направлена на восток, y – на север, z – вертикально вверх. Математическая модель основывается на уравнениях движения и неразрывности, записанных в декартовой системе координат (x, y, z) с использованием приближений Буссинеска и гидростатики [3, 7, 8]:

$$\frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (2)$$

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

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

Здесь u, v, w – проекции скорости по осям x, y, z соответственно; t – время; $d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x + v\partial/\partial y + w\partial/\partial z$ – полная производная; p – давление; ρ – плотность; g – ускорение свободного падения; f – параметр Кориолиса; A_M – коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости, вычисляемый по формуле Смагоринского [9]; K_M – коэффициент вертикальной турбулентной вязкости, для определения которого используется теория Меллора – Ямады [10].

Граничные условия на свободной поверхности ($z = \zeta(x, y)$) имеют вид:

$$w|_{z=\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad (5)$$

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

При этом $\tau_{0x} = C_a W_x |\mathbf{W}|$ и $\tau_{0y} = C_a W_y |\mathbf{W}|$ – проекции касательных напряжений ветра [3]; (W_x, W_y) – компоненты вектора скорости ветра \mathbf{W} на высоте 10 м над уровнем моря; C_a – эмпирический коэффициент поверхностного трения, который варьируется в зависимости от скорости ветра [11]:

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

На дне ($z = -H(x, y)$) равна нулю нормальная составляющая скорости:

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

Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [3]:

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

$$\tau_{1x} = C_d u \sqrt{u^2 + v^2}, \quad \tau_{1y} = C_d v \sqrt{u^2 + v^2}. \quad (10)$$

В граничных условиях (10) C_d – коэффициент донного трения, который находится по формуле $C_d = k^2 / (\ln^2 z_1 / z_0)$, где z_1 – шаг по вертикали в придонном слое, $z_0 = 0,03$ мм – параметр шероховатости, характеризующий гидродинамические свойства подстилающей донной поверхности; $k = 0,4$ – постоянная Кармана.

На боковых границах выполняются условия прилипания [7]. В начальный момент времени $t = 0$ движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна:

$$u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \quad w(x, y, z, 0) = 0, \quad \zeta(x, y, z, 0) = 0. \quad (11)$$

Для расчета распространения примеси концентрации $C(x, y, z, t)$ используем уравнение переноса и диффузии [3, 5]

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right). \quad (12)$$

Здесь A_H и K_H – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии. На свободной поверхности и в придонном слое к динамическим граничным условиям добавляются условия отсутствия потоков примеси через свободную поверхность, боковые стенки (S) в направлении нормали \mathbf{n} и дно бассейна:

$$\left(K_H \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} \right) \Big|_{z=\zeta} = 0, \quad \left(A_H \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} \right) \Big|_S = 0, \quad \left(K_H \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} \right) \Big|_{z=-H} = 0. \quad (13)$$

Над Азовским морем, начиная с $t = 0$, действует постоянный ветер, генерирующий стационарные течения. При этом выбран однородный по пространству ветер, скорость которого первые три часа ($0 < t \leq 3$ ч) нарастает со временем по линейному закону, достигает своего наибольшего значения и далее не меняется.

Условие выхода на стационарный режим определяется тем, что между двумя соседними значениями времени не происходит заметных изменений отклонений уровня моря и скоростей течений (не более 5%). Исходя из этого, рассчитываем время установления движения жидкости ($t = t_0$). Область загрязнения при $t = t_0$ расположена в поверхностном слое и имеет вид пятна радиуса R :

$$C_0(x, y, z, t_0) = \begin{cases} 1, & r \leq R, 0 \geq z \geq -z_1, \\ 0, & r > R, z < 0; r \leq R, z < -z_1, \end{cases} \quad (14)$$

где z_1 – толщина слоя области загрязнения; $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ – расстояние от центра этой области (x_0, y_0) до точки, для которой вычисляется концентрация. В качестве параметров, характеризующих эволюцию загрязнения, выбраны: время рассеяния примеси t_d и K_{\max} – коэффициент максимальной площади ее распространения на различных горизонтах. При этом $K_{\max} = S_{\max}/S_0$, S_0 – площадь области начального загрязнения, S_{\max} – ее наибольшее значение. Условием полного рассеяния примеси принимается значение концентрации, не превышающее $2,5 \cdot 10^{-2}$ во всей акватории моря ($C_d = 2,5 \cdot 10^{-2}$).

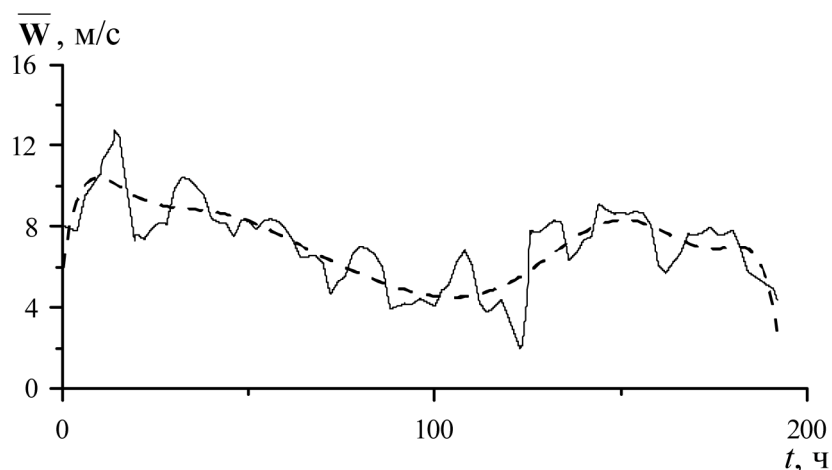
Для численной реализации в исходных уравнениях движения (1) – (4), переноса – диффузии (12), граничных (5), (6), (8), (9), (13) и начальных условиях (11) выполняется переход от координаты z к σ -координате [3 – 5]. В этом случае алгоритм решения базируется на применении двухслойных разностных схем. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости для баротропных волн [12]. Топография дна расчетной области на модельную сетку интерполирована по данным массива глубин, взятого с навигационных карт. Отклонения уровня Азовского моря анализируются по результатам моделирования для девяти станций, расположенных вблизи крупных населенных пунктов.

Анализ численных экспериментов. В серии численных экспериментов исследуется влияние совместного действия стационарного ветра и полученного по данным региональной прогностической системы SKIRON (с 8 по 18 сентября 2007 г.) на максимальные скорости течений, эволюцию примеси и экстремальные значения сгонов и нагонов в Азовском море. Пространственное разрешение атмосферных полей 10 км, дискретность по времени 2 ч.

Исследование установившихся течений выполнено для двух значений скорости постоянного западного ветра 5 и 10 м/с ($\mathbf{W}_{st}^{1,2} = \{5; 10\}$ м/с). Для установления физических закономерностей влияния интенсивности атмосферных воздействий в качестве переменного по времени и неоднородного по пространству ветра выбраны поля приводного ветра модели SKIRON [6], а также поля ветра, в два раза увеличенные и уменьшенные по отношению к указанным выше данным ($\gamma \mathbf{W}_{SKIRON}$; $\gamma = 1/2; 1; 2$). Результаты расчетов сравниваются с информацией, полученной при моделировании волн и течений, вызванных действием только постоянного или прогностического ветра.

По данным системы SKIRON с 8 по 18 сентября 2007 г. проведем анализ величины осредненной по акватории Азовского моря скорости ветра. На рис. 1 даны графики средней скорости и ее тренд в течение 192 ч (результаты, полученные для первых 3 сут, не анализируются и используются для определения начальных данных о скоростях течений и уровне моря на 0 ч 11 сентября 2007 г.). Средняя скорость ветра в каждый момент времени рассчитывалась по формуле $\bar{W} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^N |\mathbf{W}_k|$, где n – число узлов расчетной сетки,

$|\mathbf{W}_k| = \sqrt{u_k^2 + v_k^2}$ – модуль скорости ветра в ее k -м узле.



Р и с. 1. Средняя скорость ветра над Азовским морем с 11 по 18 сентября 2007 г. (сплошная линия) и ее тренд (штриховая)

Аппроксимация \bar{W} полиномом 9-й степени проводится по методу наименьших квадратов и дает тренд поведения скорости (рис. 1, штриховая линия). Из рисунка видно, что в течение первых 2 сут происходило усиление ветра до 9 м/с, в период следующих 3 сут скорость монотонно уменьшалась до 5 м/с. Затем в течение еще 3 сут отмечалось ее резкое снижение до 2 м/с, после чего она уже не превышала 3 м/с (над морем штиль). Средняя (по времени) скорость приводного ветра была равна 5,5 м/с. Максимум средней скорости составлял 12,7 м/с и имел место 15 сентября, минимум – 1,6 м/с 17 сентября. В среднем в течение сентября скорость приводного ветра составляла

5,5 м/с. За указанный период (192 ч) наибольшее, среднее и наименьшее значения максимальной скорости были равны 12,7; 6,7 и 1,6 м/с соответственно.

Как следует из рис. 1 (сплошная линия), поле средней скорости неоднородно. В течение коротких периодов 1 – 2 сут она то нарастает, то убывает, следовательно, меняется направление ветра. Отклонения вектора скорости ветра от направления оси x (ось x направлена на восток под углом 50° к параллели) анализировались в градусах. Из анализа преобладающих направлений ветра следует, что за указанный период преобладающими направлениями являлись северо-восточное и северо-западное, при этом также было отмечено прохождение нескольких циклонов. Подчеркнем, что результаты многолетних наблюдений атмосферных возмущений в районе Азовского моря удовлетворительно согласуются с используемыми в данных расчетах атмосферными полями системы SKIRON.

В табл. 1 приведены максимальные значения скоростей стационарных течений, вызванных постоянным ветром ($W_{st}^{1,2}$), максимальные величины скоростей течений, генерируемых приводным ветром (γW_{SKIRON} ; $\gamma = 1/2; 1; 2$) и их суперпозицией ($W_{st}^{1,2} + \gamma W_{SKIRON}$). Здесь же указаны горизонты и координаты наибольших значений скоростей, а также время их достижения. Из анализа этих данных следует, что при наличии стационарных течений максимумы скоростей нестационарных течений (U_{max}) увеличиваются по сравнению с их значениями при действии только прогностического ветра.

Из сравнения максимумов скоростей течений на различных горизонтах следует, что значения U_{max} при $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$ возрастают на 38% (горизонт 1 м); 43% (3 м); 39% (5 м) и 20% (10 м) по сравнению со случаем W_{SKIRON} и на 78% (1 м); 81% (3 м); 80% (5 м) и 74% (10 м) по сравнению с действием только W_{st}^1 . При увеличении скорости постоянного ветра в 2 раза совместное действие $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$ приводит к росту U_{max} на 50% (1; 3 м); 47% (5 м) и 30% (10 м) по сравнению с действием W_{SKIRON} и на 63% (1 м); 64% (3 м); 62% (5 м) и 57% (10 м) по сравнению со случаем W_{st}^2 . При этом максимальные скорости стационарных течений, вызванных действием постоянного ветра со скоростью 5 м/с (W_{st}^1) и 10 м/с (W_{st}^2), увеличиваются на тех же горизонтах на 52; 53; 50 и 47% соответственно. Отсюда следует, что удвоение интенсивности стационарного ветра при совместном действии с одним и тем же нестационарным ветром приводит к увеличению максимумов скоростей нестационарных течений на 64% и стационарных течений на 53%.

Анализ скоростей течений (табл. 1) показал, что в поверхностном слое величины U_{max} под действием суперпозиции ветров $W_{st}^1 + \gamma W_{SKIRON}$ становятся больше в 1,7; 1,6 и 2,7 раза и под действием $W_{st}^2 + \gamma W_{SKIRON}$ увеличиваются в 1,6; 2,0 и 2,2 раза, чем только при γW_{SKIRON} ($\gamma = 1/2; 1; 2$ соответственно). При этом для всех скоростей ветра U_{max} убывают с ростом горизонта. Скорости течений, рассчитанные без учета стационарных течений для полей прогностического ветра интенсивности $1/2 W_{SKIRON}$ и $2 W_{SKIRON}$, отличаются не более чем на 25% по сравнению со скоростями, вызванными действием W_{SKIRON} .

Т а б л и ц а 1

**Максимальные значения скоростей течений на различных глубинах
Азовского моря, время их достижения и соответствующие им координаты**

Скорость ветра, м/с	Горизонт, м	U_{\max} , м/с	x_{\max} , км	y_{\max} , км	t_{\max} , Ч, МИН
$W_{st}^1 = 5$	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	0,09	235,34	173,00	9.44
$W_{st}^2 = 10$	1	0,34	235,38	172,19	8.35
	3	0,28	235,97	172,86	8.55
	5	0,24	237,07	171,50	8.26
	10	0,17	235,99	171,16	9.34
$1/2W_{SKIRON}$	1	0,35	198,78	188,36	131.48
	3	0,28	242,27	184,59	132.00
	5	0,25	259,84	194,38	135.18
	10	0,24	228,97	174,97	140.00
W_{SKIRON}	1	0,45	206,25	189,27	128.00
	3	0,39	241,76	188,88	130.00
	5	0,37	263,30	199,05	137.00
	10	0,28	238,20	175,76	145.00
$2W_{SKIRON}$	1	0,58	206,69	190,59	132.36
	3	0,54	236,96	184,66	134.06
	5	0,52	263,53	193,96	136.24
	10	0,41	238,66	174,55	142.36
$W_{st}^1 + 1/2W_{SKIRON}$	1	0,61	201,47	109,47	128.00
	3	0,59	224,43	183,70	130.00
	5	0,54	225,04	161,18	137.00
	10	0,35	174,63	166,87	145.00
$W_{st}^1 + W_{SKIRON}$	1	0,73	201,48	106,15	128.00
	3	0,69	224,73	176,44	130.00
	5	0,61	225,31	156,78	137.00
	10	0,35	174,86	160,92	145.00
$W_{st}^1 + 2W_{SKIRON}$	1	1,57	208,72	111,75	128.00
	3	1,39	229,55	183,06	130.00
	5	1,24	229,67	161,92	137.00
	10	1,02	175,72	168,25	145.00
$W_{st}^2 + 1/2W_{SKIRON}$	1	0,57	166,19	176,81	152.00
	3	0,45	204,45	162,96	154.00
	5	0,43	258,30	194,36	157.00
	10	0,40	210,08	147,40	162.00
$W_{st}^2 + W_{SKIRON}$	1	0,91	159,09	175,58	152.00
	3	0,78	199,38	159,67	154.00
	5	0,70	258,19	188,40	157.00
	10	0,40	209,66	146,44	162.00
$W_{st}^2 + 2W_{SKIRON}$	1	1,32	161,14	176,58	152.00
	3	1,12	202,31	166,34	154.00
	5	0,77	259,62	194,33	157.00
	10	0,66	214,06	147,13	162.00

В табл. 2 приведены максимальные значения подъемов ζ_{\max} и понижений $|\zeta|_{\max}$ уровня в открытой части Азовского моря, вызванных действием стационарного ветра ($W_{st}^{1,2}$), полями ветра прогностической модели SKIRON (γW_{SKIRON} ; $\gamma = 1/2; 1; 2$) и их совместным действием. Здесь также представлены время достижения и соответствующие координаты экстремумов уровня моря.

Т а б л и ц а 2

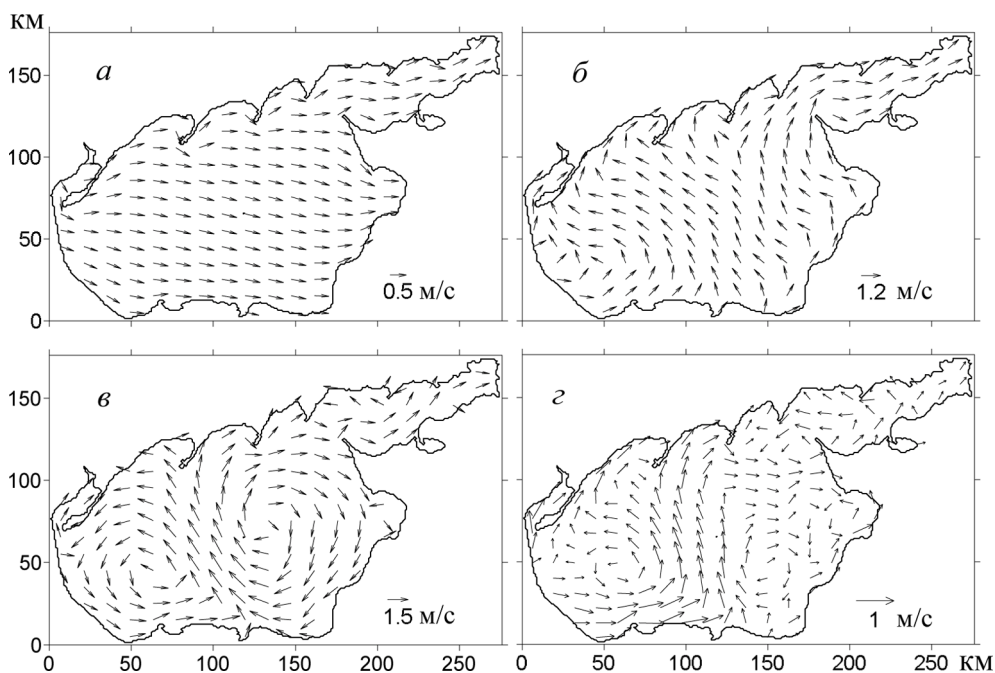
Максимальные значения подъемов ζ_{\max} и понижений $|\zeta|_{\max}$ уровня в открытой части Азовского моря, время их достижения и соответствующие им координаты

Скорость ветра, м/с	ζ_{\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
$W_{st}^1 = 5$	0,20	366,51	219,61	17.10	0,10	4,02	95,07	13.23
$W_{st}^2 = 10$	0,69	367,86	218,27	18.46	0,39	4,02	107,13	13.47
$1/2W_{SKIRON}$	0,32	282,98	96,36	168.14	0,17	24,23	126,50	190.55
W_{SKIRON}	0,43	278,50	90,10	168.15	0,25	20,10	122,50	190.55
$2W_{SKIRON}$	0,97	284,71	92,17	168.15	0,56	20,14	122,91	190.55
$W_{st}^1 + 1/2W_{SKIRON}$	0,46	299,39	104,55	171.11	0,27	29,63	127,36	191.30
$W_{st}^1 + W_{SKIRON}$	0,55	296,14	100,05	171.11	0,28	22,34	124,14	191.30
$W_{st}^1 + 2W_{SKIRON}$	1,21	303,08	100,36	171.11	0,59	28,90	131,27	191.30
$W_{st}^2 + 1/2W_{SKIRON}$	0,62	295,10	102,18	172.20	0,49	22,78	124,08	192.45
$W_{st}^2 + W_{SKIRON}$	0,72	290,20	101,10	172.20	0,58	21,25	124,00	192.45
$W_{st}^2 + 2W_{SKIRON}$	1,54	291,71	103,85	172.20	1,23	24,17	131,44	192.45

Анализ этих данных свидетельствует о том, что при увеличении скорости действующего ветра увеличиваются максимумы отклонений свободной поверхности. Так, удвоение скорости только стационарного ветра W_{st}^2 приводит к росту величины ζ_{\max} и $|\zeta|_{\max}$ в 2 и 1,7 раза по сравнению с действием W_{st}^1 . При изменении интенсивности полей ветра, полученных по модели SKIRON (γW_{SKIRON} ; $\gamma = 1/2; 1; 2$), значения ζ_{\max} и $|\zeta|_{\max}$ возрастают соответственно в 1,3; 3 и 1,4; 3,3 раза по сравнению с действием $1/2W_{SKIRON}$. Совместное действие суперпозиции рассматриваемых ветров $W_{st}^{1,2} + \gamma W_{SKIRON}$ также приводит к росту величин экстремальных отклонений. Так, при $W_{st}^2 + 1/2W_{SKIRON}$ ζ_{\max} в 1,3 и $|\zeta|_{\max}$ в 1,8 раза больше, чем при $W_{st}^1 + 1/2W_{SKIRON}$; при $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$ ζ_{\max} в 1,3 и $|\zeta|_{\max}$ в 2 раза больше, чем при $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$; при $W_{st}^2 + 2W_{SKIRON}$ ζ_{\max} в 1,2 и $|\zeta|_{\max}$ в 2,1 раза больше, чем при $W_{st}^1 + 2W_{SKIRON}$.

Таким образом, действие стационарного ветра одного направления, но бóльшей скорости (10 м/с) вызывает возрастание максимальных отклонений уровня ζ_{\max} и $|\zeta|_{\max}$: при $1/2W_{\text{SKIRON}}$ – на 48 и 65%; при W_{SKIRON} – на 40 и 57%; при $2W_{\text{SKIRON}}$ – на 37 и 54% соответственно.

Полученные в результате моделирования поля поверхностных течений Азовского моря, вызванных ветром различной интенсивности, показаны на рис. 2. В начальный период действия постоянного западного ветра при максимальной скорости 10 м/с направление течений совпадает с направлением ветра на всей акватории моря (рис. 2, а). Начиная с момента установления движения жидкости в северной части моря происходит уменьшение скоростей течений и изменение их направлений на противоположные. В центральной части моря наблюдается циркуляция вод против часовой стрелки (рис. 2, б).



Р и с. 2. Поля скоростей поверхностных течений Азовского моря в различные моменты времени: а – установившиеся течения ($t = t_0$); б – начало действия прогностического ветра ($t = t_0 + 24$ ч); в – момент времени $t = t_0 + 120$ ч; г – окончание действия прогностического ветра ($t = t_0 + 170$ ч)

С началом действия полей переменного по времени и пространству ветра W_{SKIRON} циркуляция вод нарушается, и течения становятся хаотическими (рис. 2, в). У северного побережья возникают два вихря одинакового знака. Вдоль противоположных границ моря течения направлены против ветра. В момент прохождения циклона, при скорости ветра 11,6 м/с, циркуляция характеризуется наличием трех круговоротов: антициклонического (в северной части моря) и двух циклонических (у южного берега). Вдоль границ, разделяющих основные круговороты, формируются полосы, в которых скорости течений направлены против ветра (рис. 2, г).

Таблица 3

Максимальные нагоны и сгоны (см) на береговых станциях Азовского моря, вызванные воздействием стационарного и прогностического ветров, а также их суперпозицией

Береговые станции	W_{st}^1	W_{st}^2	$1/2W_{SKIRON}$	W_{SKIRON}	$2W_{SKIRON}$	$W_{st}^1 + 1/2W_{SKIRON}$	$W_{st}^1 + W_{SKIRON}$	$W_{st}^1 + 2W_{SKIRON}$	$W_{st}^2 + 1/2W_{SKIRON}$	$W_{st}^2 + W_{SKIRON}$	$W_{st}^2 + 2W_{SKIRON}$
Геническ	-	-	20,0	25,4	31,4	29,4	32,2	51,5	39,4	62,3	66,7
Бердянск	-	-	4,9	9,6	10,9	7,0	16,9	16,9	10,2	44,3	51,7
Мариуполь	9,8	37,3	18,5	29,3	39,9	28,0	46,4	65,4	35,5	80,4	85,1
Таганрог	20,7	62,4	40,6	50,6	79,6	57,1	63,1	128,2	81,2	89,5	159,1
Ейск	13,8	52,2	19,1	38,1	59,9	30,0	76,0	93,7	38,5	102,2	123,1
Приморско-Ахтарск	8,1	43,2	40,6	57,1	89,3	61,7	80,4	129,2	85,2	91,1	189,5
Темрюк	10,2	26,9	20,2	24,5	28,6	28,4	29,7	43,3	40,8	49,9	60,9
Опасное	-	-	5,5	9,4	14,5	7,9	16,1	23,6	10,8	34,0	40,6
Мысовое	7,5	13,9	7,5	12,1	17,0	12,1	19,6	25,0	15,2	34,2	34,9
Геническ	12,2	51,7	22,3	42,5	62,2	35,5	76,5	92,5	45,4	87,0	128,0
Бердянск	4,0	17,6	9,7	17,3	27,1	15,1	30,9	38,0	20,5	62,1	77,0
Мариуполь	-	-	12,7	18,2	27,2	18,7	26,0	43,7	24,6	39,7	51,9
Таганрог	-	-	21,2	29,0	37,2	35,0	42,4	60,8	40,3	72,9	74,0
Ейск	-	-	8,7	18,9	21,5	12,3	41,1	34,5	17,6	45,3	47,4
Приморско-Ахтарск	-	-	8,4	14,1	16,1	12,2	23,8	26,2	16,3	35,5	44,4
Темрюк	-	-	6,8	8,7	13,3	10,2	11,2	18,9	13,0	33,0	36,0
Опасное	3,3	11,1	5,5	10,6	15,2	8,5	20,5	22,7	11,2	34,2	38,7
Мысовое	-	-	12,6	22,3	30,0	20,0	39,4	42,8	24,7	63,9	67,3

В табл. 3 для береговых станций Азовского моря даны значения максимальных отклонений уровня, вызванных действием стационарного ветра ($W_{st}^{1,2}$), только приводного ветра различной интенсивности (γW_{SKIRON} ; $\gamma = 1/2; 1; 2$) и их суперпозицией ($W_{st}^{1,2} + \gamma W_{SKIRON}$). В верхней части таблицы приведены величины нагонов, в нижней – сгонов.

Из анализа представленных здесь результатов расчетов следует, что наибольшие нагоны возникают при совместном действии стационарного и удвоенного прогностического ветров ($W_{st}^2 + 2W_{SKIRON}$) и имеют место на станциях Приморско-Ахтарск (189,5 см), Таганрог (159,1 см) и Ейск (123,1 см). Отсюда видно, что максимум нагона (189,5 см) в случае действия рассмотренной системы ветров в 4,38 раза больше, чем в стационарном режиме (43,2 см).

При совместном действии переменного и постоянного ветров максимальные сгоны становятся больше, чем в установившемся режиме. Для всех рассматриваемых видов ветра максимальные сгоны имеют место в Геническе: 51,7 см (W_{st}^2); 45,4 см ($W_{st}^2 + 1/2W_{SKIRON}$); 87,0 см ($W_{st}^2 + W_{SKIRON}$); 128,0 см ($W_{st}^2 + 2W_{SKIRON}$).

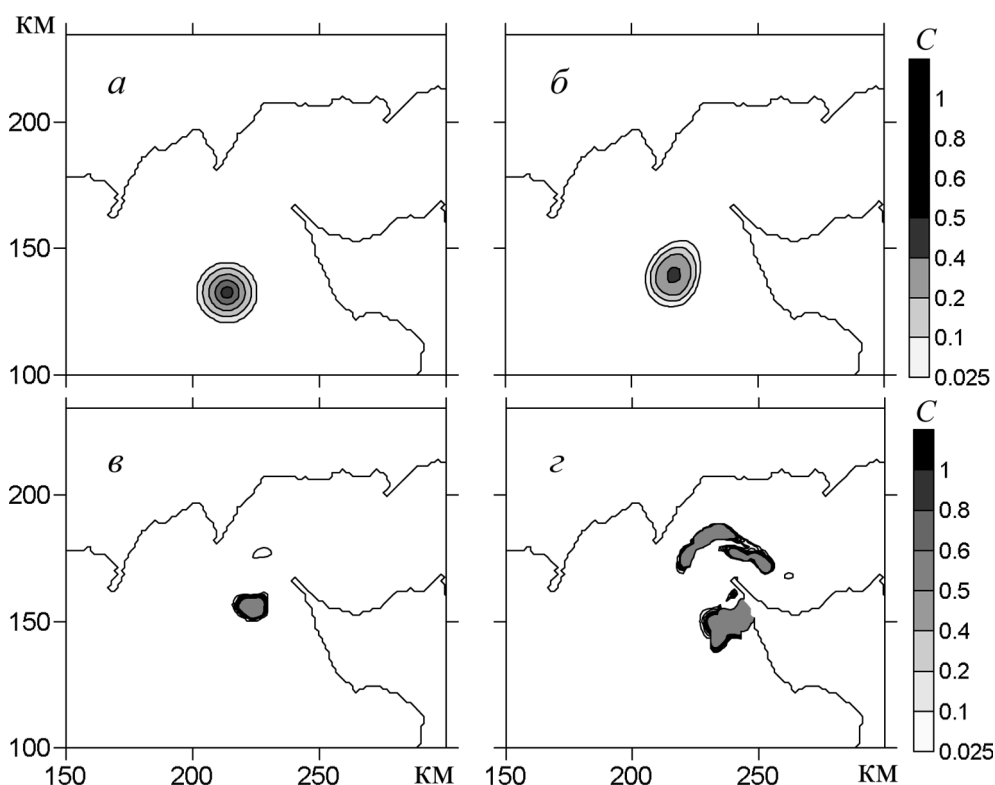
Величины сгонов и нагонов, рассчитанные в результате моделирования с использованием ветра, полученного по данным прогностической системы SKIRON, сравнивались с натурными измерениями за тот же период, приведенными в таблицах ежечасных значений высот уровня моря государственной метеорологической службой Украины. Проведенный анализ подтверждает достаточно хорошее совпадение величин амплитуд колебаний уровня, полученных путем численных расчетов и по натурным данным. Так, в Геническе рассчитанный максимум нагона на 16% меньше, чем по данным наблюдений, а в Мариуполе максимальное значение нагона на 12% меньше измеренного.

Целью следующей серии численных экспериментов является оценка влияния рассматриваемых полей ветра и возникающих при этом течений на распространение пассивной примеси, поступающей в центральный район Азовского моря.

Начальное положение центра области выброса примеси находится в точке с координатами $x_0 = 180$ км, $y_0 = 120$ км, где глубина моря составляет 12 м. Область выброса примеси имеет вид цилиндра радиусом $R = 9$ км и глубиной h_1 ($0 \geq z \geq h_1$), где h_1 – шаг по вертикали в поверхностном слое. При этом начальное значение концентрации постоянно в данной области и равно единице ($C(x, y, z, t_0) = C_0(x, y, z) = 1$).

Распространение пассивной примеси в море происходит вследствие турбулентной диффузии и адвективного переноса ее течением. На рис. 3 приведены результаты расчетов процессов турбулентно-диффузионного развития области поверхностного загрязнения. Как видно, область загрязнения первые 2 ч перемещается на запад в соответствии с направлением стационарных течений (рис. 3, а), а затем через 10 ч распадается на несколько небольших фрагментов (рис. 3, б, в). Части области переносятся от центра выброса в различных направлениях на значительные расстояния и спустя 30 ч достигают

северного побережья Азовского моря в районе Бердянска и Мариуполя (рис. 3, *з*). С течением времени участки загрязняющих веществ переносятся на запад. Полное рассеяние происходит через 149 ч, что в 2,7 раза превышает время рассеяния такой же области загрязнения в установившемся режиме.



Р и с. 3. Трансформация области загрязнения в Азовском море, вызванная действием прогностического ветра при наличии стационарных течений в различные моменты времени: *а* – установившиеся течения ($t = t_0$); *б* – начало действия прогностического ветра ($t = t_0 + 24$ ч); *в* – момент времени $t = t_0 + 120$ ч; *з* – окончание действия прогностического ветра ($t = t_0 + 170$ ч)

Время выброса загрязнения ($t = t_0$) в экспериментах различно и задается согласно типу действующего ветра. Так, для стационарного ветра $\mathbf{W}_{st}^{1,2}$ это время отвечает моменту установления движения жидкости: $t_0 = t_0^1 = 38$ ч и $t_0 = t_0^2 = 43$ ч соответственно. Для прогностического ветра момент времени выброса равен 0 ч 11 сентября 2007 г. ($t_0 = t_0^3 = 72$ ч). При совместном действии стационарного и прогностического ветров ($\mathbf{W}_{st}^{1,2} + \gamma \mathbf{W}_{SKIRON}$) это время определяется так: $t_0 = t_0^{1,2} + t_0^3$. При анализе времени распространения и рассеяния примеси для удобства принимаем, что во всех случаях время выброса равно нулю ($t_0 = 0$).

Анализ результатов численных расчетов свидетельствует о том, что площадь распространения области загрязнения в поверхностном и глубинных

слоях Азовского моря зависит от скорости ветра, действующего над акваторией. С увеличением интенсивности ветра становятся больше скорости течений (см. табл. 1) и, как следствие этого, возрастают площади распространения примеси и время ее полного рассеяния. В связи с этим наибольшая площадь загрязнения имеет место при максимальном значении скорости действующего ветра ($W_{st}^2 + 2W_{SKIRON}$).

В этом случае на свободной поверхности через 40 ч после выброса примеси достигается наибольшая величина отношения площади области загрязнения к площади области начального загрязнения ($K_{max} = 1,32$), а время полного рассеяния составляет 87 ч. Максимальное значение отношения этих площадей (1,35) на глубине 5 м достигается спустя 42 ч после выброса примеси, а ее полное рассеяние – через 110 ч. В придонном слое на глубине 12 м максимальная величина отношения этих площадей (1,38) достигается через 59 ч после выброса примеси, и через 115 ч ее концентрация во всей акватории моря не превышает 2,5% от начального значения.

Заключение. В работе представлены результаты исследования сгонно-нагонных явлений и распространения пассивной примеси системой течений, вызванных действием постоянного и переменного ветров в Азовском море. Достоверность этих результатов подтверждается сравнением рассчитанных значений экстремальных сгонов и нагонов с данными натуральных наблюдений, полученными во время действия приводного ветра по модели SKIRON на береговых гидрометеорологических станциях.

Приведены таблицы величин сгонов, нагонов и скоростей течений в зависимости от характеристик постоянного и переменного ветров. Сделаны выводы о влиянии скорости ветра и возникающих при этом течений на процесс эволюции пассивной примеси.

Автор выражает благодарность С.В. Станичному за предоставленные им массивы атмосферных полей по модели SKIRON.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Фомин В.В., Шульга Т.Я.* Исследование волн и течений, возникающих под действием ветра в Азовском море // Там же. – 2006. – № 12. – С. 110 – 115.
3. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of three dimensional coastal ocean circulation model // Three-Dimensional Coastal Ocean Models. Coast. Estuar. Sci. / Ed. N. Heaps. – Washington, D. C.: American Geophysical Union. – 1987. – 4. – P. 1 – 16.
4. *Фомин В.В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ. – 2002. – Вып. 249. – С. 246 – 255.
5. *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: Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2010. – 178 с.
6. *Kallos G., Kotroni V., Lagouvardos K.* The regional weather forecasting system SKIRON // Proc. Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments. – Univ. of Athens. – ISBN:960-8468-22-1.

7. Черкесов Л.В., Иванов В.А., Хартиев С.М. Введение в гидродинамику и теорию волн. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 264 с.
8. Сretienский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. – М.: Наука, 1977. – 815 с.
9. Smagorinsky J. General circulation experiments with primitive equations. I. The basic experiment // Mon. Wea. Rev. – 1963. – 91, № 3. – P. 99 – 164.
10. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. – 1982. – 20, № 4. – P. 851 – 875.
11. Wannawong W., Humphries U.W., Wongwises P. et al. Mathematical modeling of storm surge in three dimensional primitive equations // Intern. J. Comput. Math. Sci. – 2011. – № 5. – P. 44 – 53.
12. Courant R., Friedrichs K.O., Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics // IBM J. – 1967. – March. – P. 215 – 234.

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

Материал поступил
в редакцию 02.04.12
После доработки 10.07.12

АНОТАЦІЯ У цій роботі на основі застосування нелінійної тривимірної σ -координатної моделі досліджуються хвилі та течії в Азовському морі, які викликаються дією атмосферних полів, отриманих за даними регіональної системи прогнозу SKIRON, за наявності стаціонарних течій. Виконаний аналіз фізичних закономірностей поширення пасивної домішки в Азовському морі з урахуванням вітрових впливів різної інтенсивності та стаціонарних течій. Встановлено, що подвоєння інтенсивності стаціонарного вітру при дії з одним і тим же нестаціонарним вітром призводить до збільшення максимумів швидкостей нестаціонарних течій на 64%. При двократному збільшенні або зменшенні інтенсивності полів приводного вітру без урахування стаціонарних течій генеруються течії, швидкості яких відрізняються не більш ніж на 25% у порівнянні зі швидкостями, викликаними дією вітрових полів за даними системи SKIRON.

Ключові слова: σ -координатна модель, динамічні процеси, згонно-нагонні процеси, стаціонарні течії, пасивна домішка, приводний вітер.

ABSTRACT Based on application of a nonlinear three-dimensional σ -coordinate model, the waves and currents in the Sea of Azov induced by the atmospheric fields obtained from the SKIRON regional forecasting system data in the presence of stationary currents are investigated. Physical regularities of passive admixture distribution in the Sea of Azov are analyzed taking into account wind forcing of various intensity and presence of stationary currents. It is revealed that doubling of stationary wind intensity accompanied by one and the same non-stationary wind, results in increase of maximums of non-stationary currents' velocities by 64%. When intensity of the near-water wind fields is twice as much or little, and stationary currents are not taken into consideration, generated are the currents whose velocities differ from those induced by the wind fields' forcing forecasted by SKIRON, by no more than 25%.

Keywords: σ -coordinate model, dynamic processes, surge processes, stationary currents, passive admixture, near-water wind.