

Исследование влияния ветрового воздействия на течения и распространение примеси в Азовском море

В работе с использованием трехмерной нелинейной математической модели изучаются сгонно-нагонные явления и течения в Азовском море, вызываемые переменным ветром при наличии стационарных течений. Исследованы особенности трансформации примеси в акватории Азовского моря при совместном действии стационарного и нестационарного ветров. На основании результатов численных расчетов сделаны выводы о зависимости времени рассеяния загрязнений от скорости ветра и расположения районов загрязнений. Показано, что переменный ветер приводит к существенному увеличению отклонений уровня моря и площади распространения загрязнения по сравнению с воздействием только стационарных течений.

Введение

Азовское море, несмотря на свои небольшие размеры, имеет важное народнохозяйственное значение. Прежде всего оно отличается высокими рыбными запасами, обусловленными мелководностью моря и низкой соленостью его вод. Месторождения лечебных грязей и минеральных вод создают благоприятные условия для использования моря в лечебно-курортных и рекреационных целях. Также Азовское море является важным звеном транспортного сообщения между портами Волжско-Камского и Азово-Черноморского бассейнов. Сравнительно небольшое по площади и объему море испытывает значительные антропогенные нагрузки, которые проявляются в его продолжающемся распреснении и ухудшении качества вод [1].

Мелководность и внутриконтинентальное расположение моря определяют большую временную изменчивость гидрологических характеристик. По данным многолетних наблюдений [2], размах колебаний уровня составляет от 2,0 (Бердянск) до 6,1 м (Таганрог). Азовское море относится к числу наиболее изученных, имеется сеть морских береговых станций и постов, проводятся стандартные и специализированные экспедиционные исследования. Однако комплексных работ, дающих представление о гидрометеорологических процессах в целом, очень мало.

Численное моделирование позволяет глубже понять взаимосвязи между Азовским морем и сезонными изменениями погоды. В работе [3] с использованием двумерных уравнений мелкой воды сделан анализ длинноволновых возмущений, вызванных прохождением циклонов над Азовским морем. Моделирование ветрового волнения и циркуляции в этом районе для однородных по пространству и типовых распределений ветра проводится в [4]. В статьях [5, 6] выполнено исследование времени полного рассеяния примеси, максимальной площади загрязнения и трансформации областей загрязнения под действием только переменного по времени ветра в зависимости от его скорости.

В настоящей работе с использованием трехмерной нелинейной математической модели изучаются динамические процессы, возникающие в Азов-

ском море под действием переменного по времени ветра при наличии стационарных течений. Приводятся результаты анализа влияния стационарных течений на трансформацию примеси для различных параметров переменного ветра.

Постановка задачи

Граничные и начальные условия. Введем систему координат, в которой ось x направлена на восток, y – на север, z – вертикально вверх. Для расчета используем нелинейные уравнения движения однородной несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [4, 7]:

$$\frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (\tau_{11}) + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{12}) + \frac{\partial}{\partial z} K_M \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (\tau_{21}) + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{22}) + \frac{\partial}{\partial z} K_M \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (2)$$

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

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

Здесь все обозначения общепринятые.

Компоненты тензора турбулентных напряжений Рейнольдса τ_{ij} в (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 [8]. Для параметризации коэффициента вертикальной турбулентной вязкости K_M использовалась теория Меллора – Ямады [9].

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 [10].

На боковых границах выполняется условие прилипания. 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 [7]:

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

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:

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

Над Азовским морем начиная с $t = 0$ действует постоянный ветер, генерирующий стационарные течения. В качестве ветра, выводящего течения на установившийся режим, выбран однородный по пространству ветер, скорость которого \mathbf{W}_{st} первые 3 ч ($0 < t \leq 3$) нарастает со временем по линейному закону, достигает своего наибольшего значения и далее не меняется.

Момент времени выхода течений на установившийся режим ($t = t_0$) определяем из условия, что относительные изменения полной энергии, осредненной по объему моря на смежных шагах по времени, не превосходят 1% [11]. Этот момент времени считаем началом действия переменного ветра и выброса загрязнения. Начиная с $t = t_0$ над Азовским морем в поле стационарного ветра возникает переменный по времени и однородный по пространству ветер со скоростью \mathbf{W}_{var} . Тогда выражение для скорости приводного ветра

$$\text{имеет вид } \mathbf{W} = \begin{cases} \mathbf{W}_{st}, & 0 \leq t \leq t_0, \\ \mathbf{W}_{st} + \mathbf{W}_{var}, & t > t_0. \end{cases} \quad \text{Скорость } \mathbf{W}_{var} \text{ начиная с момента}$$

времени $t = t_0$ линейно нарастает и через 3 ч в каждой точке акватории достигает своего наибольшего значения. Далее в течение 12 ч не изменяется, следующие 3 ч линейно убывает до нуля.

Область загрязнения при $t = t_0$ расположена в поверхностном слое и имеет вид пятна радиусом R :

$$C(x, y, z, t_0) = C_0 = \begin{cases} 1, & r \leq R, 0 \geq z \geq -z_1, \\ 0, & r > R, z < 0; r \leq R, z < -z_1. \end{cases} \quad (11)$$

Здесь $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ – расстояние от центра области (x_0, y_0) до точки, в которой вычисляется концентрация; z_1 – толщина слоя области загрязнения, которое считается рассеявшимся при условии, что максимум концентрации C_d становится равным $2,5 \cdot 10^{-2}$.

Для расчета изменения концентрации $C(x, y, z, t)$ используем уравнение переноса и диффузии [7]

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

где A_H и K_H – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии.

К граничным условиям на свободной поверхности и в придонном слое добавляются условия

$$\left(K_H \frac{\partial C}{\partial n} \right) \Big|_{z=\zeta} = 0, \quad (13)$$

$$\left(K_H \frac{\partial C}{\partial n} \right) \Big|_{z=-H} = 0. \quad (14)$$

На боковых границах выполняется условие отсутствия потока примеси в направлении внешней нормали \mathbf{n} :

$$A_H \frac{\partial C}{\partial n} = 0. \quad (15)$$

Численная реализация модели и выбор параметров. В исходных уравнениях (1) – (4), граничных условиях (6) – (9), (13) – (15) и начальных (10) осуществляется переход от координаты z к σ -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 σ -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.

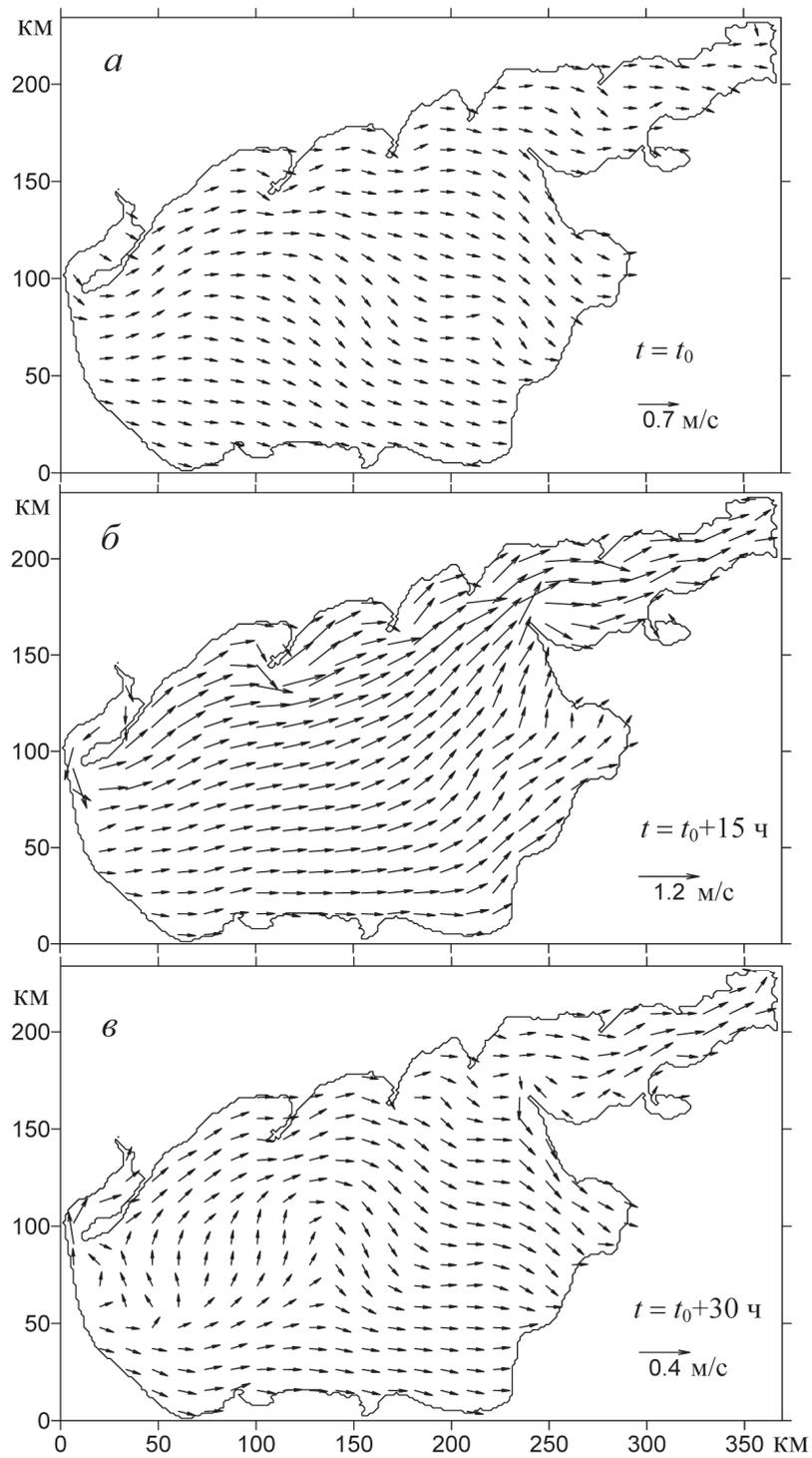
Сезонные изменения погоды на Азовском море формируются под влиянием крупномасштабных синоптических процессов. В осенне-зимнее время на Азовское море воздействует отрог сибирского антициклона, в весенне-летнее время – отрог Азорского максимума [2, 12]. Ветры неустойчивы по направлению, их скорость незначительна (5 м/с). Часто наблюдается полный штиль. Весной над морем перемещаются средиземноморские циклоны, которые сопровождаются юго-западными ветрами со скоростью 4 – 10 м/с. В численных расчетах выход течений на установившийся режим осуществляется под действием постоянного западного ветра, скорость которого изменяется в пределах 5 – 15 м/с ($W_{st}^1 = 5$, $W_{st}^2 = 10$, $W_{st}^3 = 15$ м/с). Для поля нестационарного западного ветра продолжительностью действия 12 ч наибольшая скорость принималась равной 5 и 10 м/с.

Анализ численных экспериментов

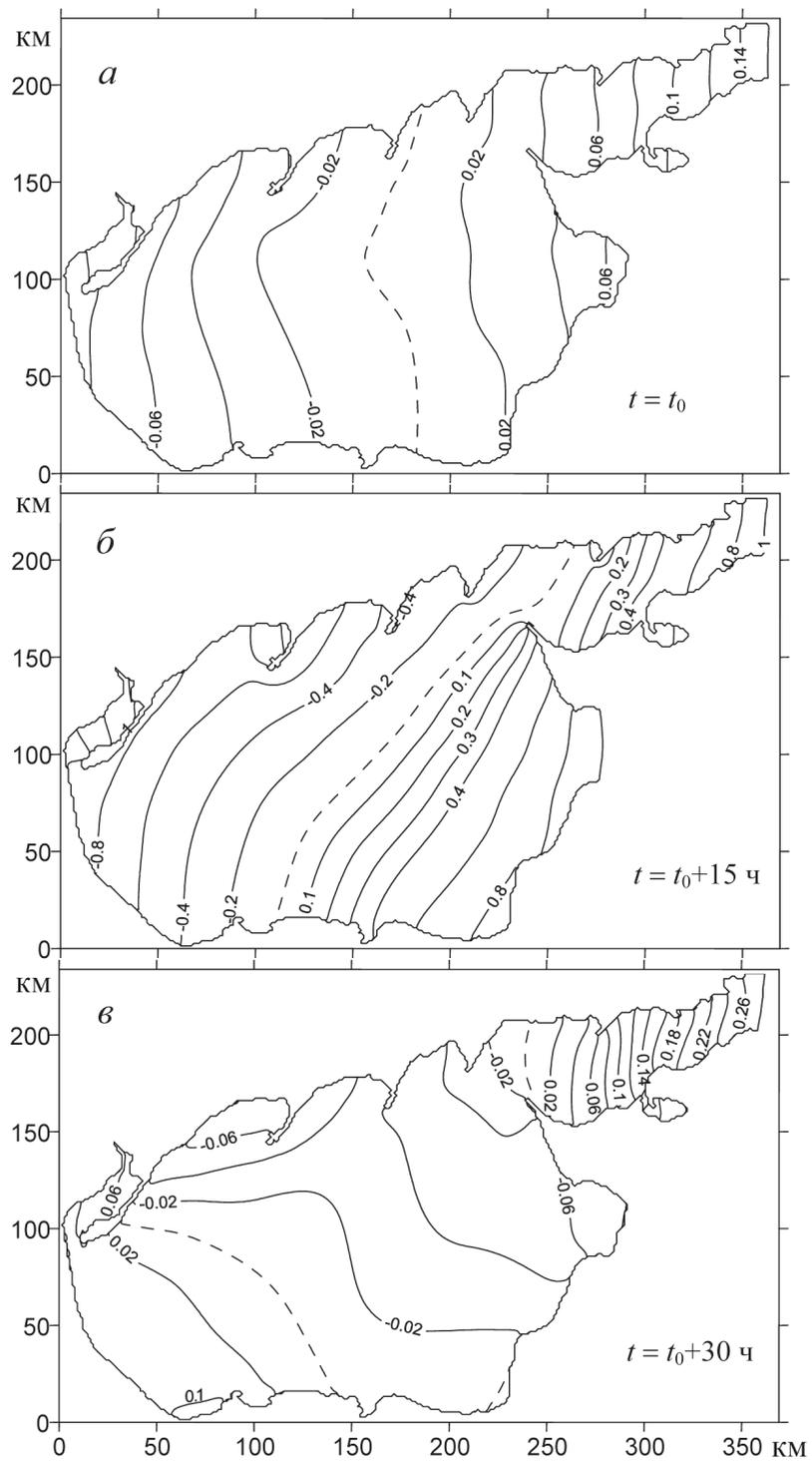
1. В первой серии численных экспериментов исследуется влияние различных параметров постоянного и нестационарного ветров на отклонения уровня моря и поля скоростей течений. На рис. 1 приведены поля скоростей течений на поверхности моря в моменты времени, соответствующие различным ветровым режимам.

Для стационарного режима (рис. 1, *а*) характерно преобладающее направление течений в одну сторону с действующим ветром, и только в центральной части моря течения отклоняются на $40 - 50^\circ$ от него. С началом действия нестационарного ветра структура течений изменяется (рис. 1, *б*). Их направление через 15 ч ($t = t_0 + 15$ ч) во всей акватории ориентировано на восток, заметно увеличивается скорость, и наибольшее ее значение отмечается в Таганрогском заливе. Спустя 12 ч ($t = t_0 + 30$ ч) после прекращения действия переменного ветра (рис. 1, *в*) вдоль побережья и в Таганрогском заливе преобладает направление течений в одну сторону со стационарным ветром, в центральной части моря имеет место антициклонический меандр струй течений. При этом скорости течений существенно уменьшаются.

Поля уровня моря, полученные в результате моделирования, показаны на рис. 2 (в те же моменты времени что и на рис. 1). Отсюда видно, что в установившемся режиме (рис. 2, *а*) отмечаются понижение уровня вдоль западного побережья (сгоны) и повышение – вдоль восточного берега (нагоны). Узловая (штриховая) линия пересекает центральную часть моря, она ориентирована перпендикулярно направлению ветра. Через 15 ч после начала действия переменного ветра (рис. 2, *б*) узловая линия повернута по часовой стрелке относительно центральной области моря. Зоны сгона и нагона сохраняются в тех же областях моря, что и в установившемся режиме, при этом их величина существенно возрастает. С прекращением действия нестационарного ветра (рис. 2, *в*) в центральной части моря отмечается понижение уровня, а в западной и восточной областях – его повышение. В то же время в Таганрогском заливе последствия действия переменного ветра мало сказываются на изменениях полей уровня.



Р и с. 1. Поля скоростей течений в слое 0 – 1 м: *a* – при постоянном ветре; *б* – при совместном действии постоянного и переменного ветров; *в* – через 12 ч после прекращения действия переменного ветра



Р и с. 2. Поля уровня (м) Азовского моря в те же моменты времени, что на рис. 1

В табл. 1 приведены скорости стационарных течений и максимальные скорости нестационарных течений, вызванных совместным действием постоянного и переменного ветров различных скоростей.

Т а б л и ц а 1

**Скорости стационарных течений
и максимальные скорости нестационарных течений (см/с),
вызванных совместным действием постоянного и переменного ветров**

Глубина, м	W_{st}^1	$W_{st}^1 = 5 \text{ м/с}$		W_{st}^2	$W_{st}^2 = 10 \text{ м/с}$		W_{st}^3	$W_{st}^3 = 15 \text{ м/с}$	
		W_{var}			W_{var}			W_{var}	
		5 м/с	10 м/с		5 м/с	10 м/с		5 м/с	10 м/с
0	14	73	86	34	91	140	62	125	157
3	11	69	79	28	85	127	52	117	146
5	9	61	75	24	72	81	46	110	135
10	6	45	52	17	65	91	32	77	94

Из анализа данных, представленных в таблице следует, что при увеличении скорости постоянного ветра в 2 и 3 раза скорости стационарных течений на поверхности достигают 14; 34; 62 см/с, т. е. возрастают соответственно в 1,8 и 4,4 раза. Под действием переменного ветра скорости течений на всех горизонтах увеличиваются. Сравнивая максимальные скорости течений в поверхностном слое, генерируемых переменным ветром при различных скоростях постоянного (86 см/с при W_{st}^1 ; 140 см/с при W_{st}^2 ; 157 см/с при W_{st}^3), отметим их возрастание в 1,6 и 1,8 раза для больших в 2 и 3 раза значений W_{st} . Такое же соотношение скоростей течений прослеживается и на других горизонтах. При этом происходит уменьшение скорости течений с глубиной, наименьшее значение отмечается в придонном слое.

Выполним сравнение максимумов вертикальных скоростей течений на различных горизонтах в стационарном и нестационарном режимах. В табл. 2 приведены максимальные значения вертикальной компоненты скорости (w) течений, вызванных совместным действием постоянного и переменного ветров различных скоростей.

Т а б л и ц а 2

**Максимумы вертикальной скорости течений (мм/с),
вызванных совместным действием постоянного и переменного ветров**

Глубина, м	W_{st}^1	$W_{st}^1 = 5 \text{ м/с}$		W_{st}^2	$W_{st}^2 = 10 \text{ м/с}$		W_{st}^3	$W_{st}^3 = 15 \text{ м/с}$	
		W_{var}			W_{var}			W_{var}	
		5 м/с	10 м/с		5 м/с	10 м/с		5 м/с	10 м/с
0	0,02	0,05	0,14	0,05	0,10	0,23	0,12	0,16	0,35
3	0,05	0,12	0,26	0,12	0,24	0,38	0,25	0,35	0,53
5	0,06	0,13	0,27	0,15	0,26	0,41	0,27	0,38	0,56
10	0,04	0,09	0,21	0,11	0,18	0,29	0,20	0,27	0,42

Из анализа представленных данных следует, что для рассматриваемых синоптических ситуаций наибольшее значение w отмечается на горизонте $z = 5 \text{ м}$, наименьшее – в поверхностном слое. Относительная разница между

максимумами вертикальных скоростей на этих глубинах (0,35 мм/с ($z = 0$) и 0,56 мм/с ($z = 5$ м)) составляет 38%.

Воздействие стационарного и переменного ветров наибольших скоростей вызывает течения, имеющие и большие значения максимумов w . Так, действие постоянного ветра трех скоростей 5, 10 и 15 м/с на глубине 5 м генерирует течения, максимум вертикальной скорости которых равен 0,06; 0,15 и 0,27 мм/с соответственно. Таким образом, постоянный ветер в 2 и 3 раза большей скорости вызывает возрастание w в 2,5 и 4,5 раза.

Как следует из табл. 2, под действием ветров наибольших из рассматриваемых скоростей ($W_{st}^3 = 15$ м/с и $W_{var} = 10$ м/с) достигается максимальное значение вертикальной компоненты скорости 0,56 мм/с ($z = 5$ м). Эта величина по отношению к максимуму модуля горизонтальной скорости (табл. 1) на том же горизонте (135 см/с) составляет $3,9 \cdot 10^{-4}$ от него. При этом соотношение между наибольшими значениями вертикальной (0,27 мм/с) и горизонтальной (46 см/с) компонент скорости стационарных течений на этой же глубине составляет $5,8 \cdot 10^{-4}$. Анализируя максимумы w , отметим их рост до 65% для нестационарного случая.

В табл. 3 приведены рассчитанные значения максимумов нагонов и сгонов на береговых станциях Азовского моря, вызванных совместным действием постоянного и переменного ветров различных скоростей. В верхней части таблицы даны значения нагонов, в нижней – сгонов.

Т а б л и ц а 3

Максимальные нагоны и сгоны (см) на береговых станциях Азовского моря для различных скоростей постоянного и переменного ветров

Береговые станции	W_{st}^1	$W_{st}^1 = 5$ м/с		W_{st}^2	$W_{st}^2 = 10$ м/с		W_{st}^3	$W_{st}^3 = 15$ м/с	
		W_{var}			W_{var}			W_{var}	
		5 м/с	10 м/с		5 м/с	10 м/с		5 м/с	10 м/с
Геническ	0,0	8,7	24,2	0,3	10,5	30,1	0,5	14,4	35,3
Бердянск	0,1	14,1	37,6	2,5	24,6	58,8	11,1	39,3	86,5
Мариуполь	9,8	40,2	95,2	37,3	85,2	153,7	83,7	159,8	248,1
Таганрог	20,7	75,2	174,0	77,4	134,9	244,4	170,9	252,5	389,7
Ейск	13,8	54,0	120,2	52,2	94,7	159,3	116,8	180,4	263,4
Приморско-Ахтарск	9,9	44,7	116,2	43,2	96,5	199,2	109,7	179,3	313,0
Темрюк	6,1	27,2	73,6	26,9	53,0	119,1	68,0	91,3	177,0
Опасное	3,6	14,7	41,2	15,6	25,2	62,2	39,0	39,0	83,5
Мысовое	0,9	7,6	17,4	3,9	3,9	11,7	10,6	10,6	10,6
Геническ	12,2	55,3	140,7	51,7	113,0	210,8	130,3	225,6	330,0
Бердянск	4,0	17,7	47,2	17,6	33,6	74,5	44,1	53,3	105,8
Мариуполь	0,5	7,7	8,6	1,9	1,9	1,9	3,1	3,1	3,1
Таганрог	1,2	14,6	18,5	5,4	5,4	5,4	17,0	17,0	17,0
Ейск	0,0	10,4	12,3	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3
Приморско-Ахтарск	0,0	18,4	48,8	0,0	0,4	43,3	0,0	0,0	2,6
Темрюк	1,9	27,0	65,0	4,4	37,7	75,6	0,5	40,1	72,5
Опасное	3,1	26,4	63,9	11,1	42,3	88,4	21,8	64,8	111,3
Мысовое	6,3	27,2	70,5	25,9	63,9	131,9	61,5	116,8	203,4

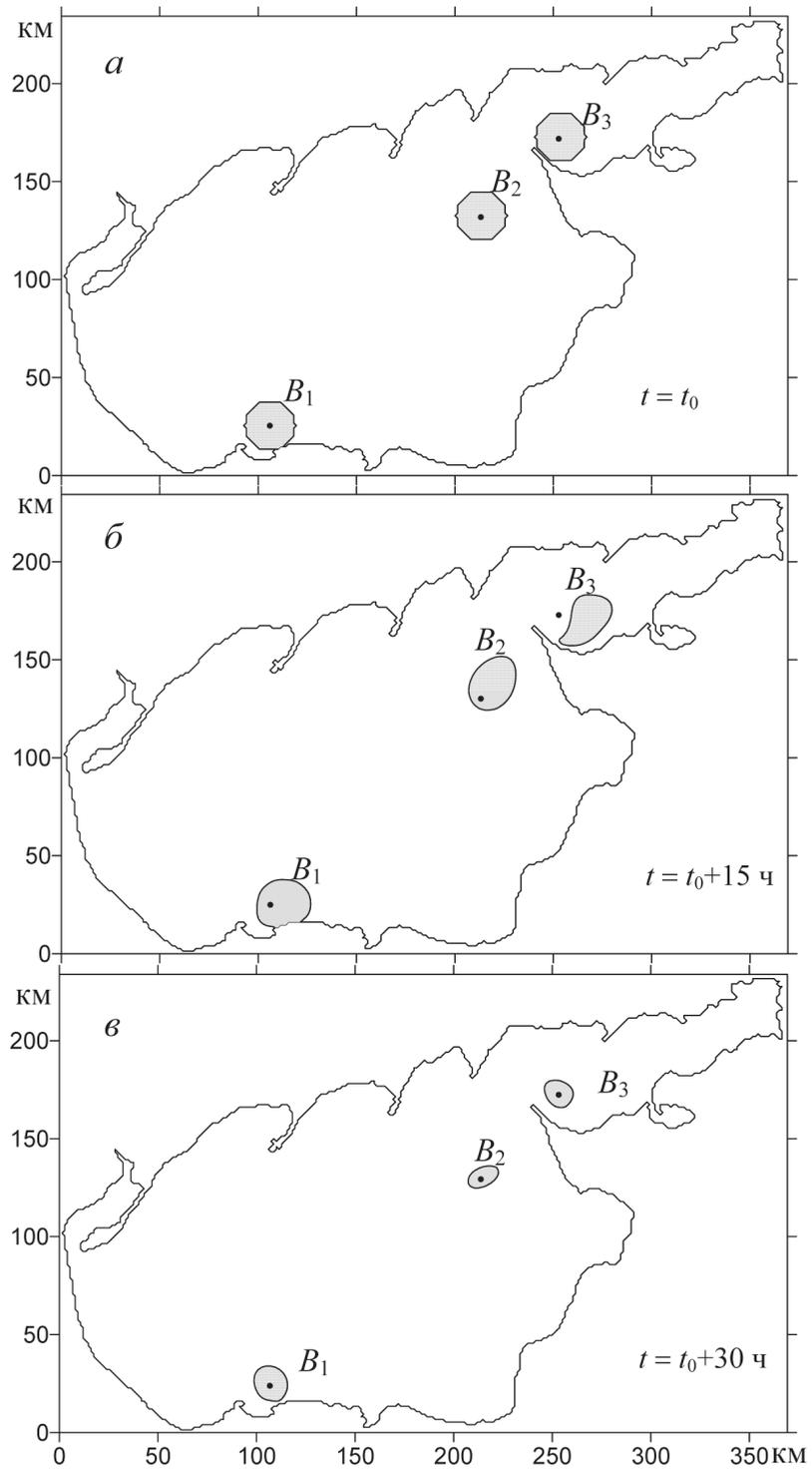
Из анализа представленных данных следует, что наибольшие нагоны, генерируемые системой ветров западного направления, отмечаются на станции Таганрог. Их величина тем больше, чем больше скорости полей ветра W_{st} и W_{var} . Так, в стационарном режиме нагоны здесь составляют 20,7 (W_{st}^1); 77,4 (W_{st}^2) и 170,9 см (W_{st}^3), т. е. при большей в 2 и 3 раза скорости ветра максимум нагонов возрастает в 3,7 и 8,3 раза. В результате совместного воздействия переменного и постоянного ветров максимальные отклонения уровня становятся больше, чем в установившемся режиме. Для Таганрога имеет место увеличение нагонов в 2,6 раза при $W_{var} = 5$ м/с и в 3,6 раза при $W_{var} = 10$ м/с.

Из анализа данных, приведенных в нижней части табл. 3, видно, что наибольшие сгоны формируются для всех рассматриваемых значений скоростей ветра на станции Геническ. Под действием постоянного ветра скоростей 5, 10 и 15 м/с на этой станции сгоны составляют 12,2; 51,7 и 130,3 см соответственно, т.е. возрастают в 4,2 и 10,6 раза. Совместное действие системы ветров приводит к возрастанию максимальных сгонов для $W_{var} = 5$ м/с в 2,8 раза и для $W_{var} = 10$ м/с в 4,1 раза.

2. В следующей серии численных экспериментов оценим влияние параметров ветра и положения источников загрязнения на распространение пассивной примеси, поступающей в море в различных районах. Загрязняющие вещества распространяются под действием турбулентной диффузии и переносятся течениями, генерируемыми постоянным и переменным ветрами.

Согласно информации о состоянии морской и прибрежной экосистем, полученной в ходе морских экспедиций на НИС «Профессор Панов» и «Денеб» ЮНЦ РАН за период 2003 – 2006 гг., была проведена оценка качества вод Азовского моря, выделены зоны экологического риска [1]. На основании показателей бентического индекса *AMBI* проведено экологическое картирование акватории Таганрогского залива и выявлено, что значительная часть экосистемы залива находится в нарушенном состоянии.

С учетом оценки состояния экосистемы Азовского моря [1] были выбраны районы расположения центров выбросов загрязнений. Они показаны на рис. 3, а: B_1 – в районе Восточно-Казантипского газового месторождения ($H = 10$ м); B_2 – над самой глубоководной ($H = 12$ м) частью моря; B_3 – в Таганрогском заливе ($H = 8$ м). Выброс загрязнений происходит на свободной поверхности в момент времени $t = t_0$ в виде пятен радиусом 9 км. Для расчета диффузии примеси нейтральной плавучести выбраны следующие значения коэффициентов: $A_H = 10$ м²/с, $K_H = 10^{-4}$ м²/с [13]. Для количественной оценки изменения площадей загрязнения с течением времени в поверхностном слое ($z = 0$), в районе половины глубины бассейна ($z = -H/2 = h_1$) и в придонном слое ($-H < z < h_2$, где $h_2 = -H + z_2$) используем коэффициент K_{max} , который рассчитываем как отношение максимальной площади S_{max} , ограниченной изолинией концентрации примеси C_d в момент времени $t = t_{max}$, к площади первоначального загрязнения S_0 при $t = t_0$ ($K_{max} = S_{max}/S_0$).



Р и с. 3. Трансформация областей загрязнений с концентрацией не менее 0,025 в те же моменты времени, что на рис. 1

В табл. 4 приведены коэффициент максимального распространения области загрязнения (K_{\max}), время его достижения (t_{\max} , ч) и полного рассеяния (t_d , ч) примеси на разных глубинах моря для различных скоростей постоянного ветра и при наличии переменного ветра скоростью 10 м/с.

Т а б л и ц а 4

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; $W_{st}^3 = 15$ м/с) и переменного ($W_{var} = 10$ м/с) ветров

Глубина, м	Максимальные значения	$W_{st}^1 + W_{var}$			$W_{st}^2 + W_{var}$			$W_{st}^3 + W_{var}$		
		Центр выброса			Центр выброса			Центр выброса		
		B_1	B_2	B_3	B_1	B_2	B_3	B_1	B_2	B_3
$0 \leq z \leq z_1$	K_{\max}	1,22	1,21	1,14	1,23	1,22	1,15	1,25	1,22	1,16
	t_{\max} , ч	10	10	14	10	10	14	11	11	14
	t_d , ч	84	74	60	84	74	60	87	74	60
$z = h_1$	K_{\max}	1,24	1,23	1,22	1,24	1,24	1,22	1,27	1,25	1,22
	t_{\max} , ч	32	28	10	32	28	10	34	29	15
	t_d , ч	100	84	66	101	86	67	104	89	70
$z = h_2$	K_{\max}	1,31	1,32	1,24	1,31	1,32	1,24	1,33	1,33	1,24
	t_{\max} , ч	28	28	16	28	28	16	35	30	16
	t_d , ч	108	90	76	108	90	78	110	92	79

Оценим влияние направления стационарных течений (рис. 1, а) и переменного ветра на перемещение загрязнения в районе B_1 , где осваиваются газовые месторождения. Глубина моря в этом районе 10 м. Центр выброса находится в точке с координатами $x_0 = 110$ км, $\phi_0 = 45$ км. В пункте поступления примеси стационарные течения направлены в одну сторону с действующим ветром (рис. 1, а), куда происходит перенос примеси (рис. 3, б). Спустя 12 ч после прекращения действия нестационарного ветра наблюдается сокращение площадей загрязнения и уменьшение концентрации примеси (рис. 3, в).

Из анализа данных, приведенных в табл. 4, следует, что для района B_1 максимальная площадь загрязнения имеет место при максимальном значении скорости стационарного ветра W_{st}^3 . Так, на свободной поверхности $\hat{E}_{\max} = 1,25$ достигается через 11 ч после выброса примеси. При этом время ее полного рассеяния составляет 87 ч. На глубину $z = h_1$ загрязнение проникает спустя 2 ч после выброса примеси на поверхность. Далее площадь загрязнения увеличивается и при $t_{\max} = 34$ ч становится максимальной ($\hat{E}_{\max} = 1,27$). Полное рассеяние загрязнения на этой глубине происходит при $t_d = 104$ ч. В придонном слое ($z = h_2$) наибольший коэффициент (1,33) рас-

пространения области загрязнения отмечен при $t_{\max} = 35$ ч, и спустя 110 ч с момента выброса примеси ее концентрация становится равной C_d .

В районе аварийного выброса B_2 ($x_0 = 180$ км, $\phi_0 = 120$ км) под действием нестационарного ветра перенос области загрязнения (рис. 3, б) также обусловлен направлением течений (рис. 1, б). После прекращения действия переменного ветра пятно смещается в западном направлении, обратном направлению ветра (рис. 3, в). Из анализа данных, приведенных в табл. 4, видно, что при W_{st}^3 максимум площади, занятой загрязнением на поверхности, составляет 1,22 ($t_{\max} = 11$ ч), на глубине $z = h_1 - 1,25$ ($t_{\max} = 29$ ч), в придонном слое – 1,33 ($t_{\max} = 30$ ч). Рассеяние примеси происходит через 92 ч после ее появления.

Глубина моря в районе выброса загрязнения, центром которого является пункт B_3 ($x_0 = 260$ км, $\phi_0 = 170$ км), наименьшая из рассматриваемых и равна 8 м. В Таганрогском заливе скорости установившихся течений наибольшие и в слое 0 – 1 м достигают 86; 140 и 157 см/с при $W_{st} = 5$; 10 и 15 м/с соответственно (табл. 1). Рис. 3, б соответствует 15 ч после начала действия нестационарного ветра, когда имеют место наиболее интенсивные течения. Видно, что на свободной поверхности области загрязнения увеличиваются, становятся вытянутыми вдоль направления ветра и перемещаются на восток. Согласно данным, приведенным в табл. 4, значения K_{\max} для этого района наименьшие по сравнению с остальными: на поверхности $K_{\max} = 1,16$ ($t_{\max} = 14$ ч), на глубине $z = h_1 - K_{\max} = 1,22$ ($t_{\max} = 15$ ч), в придонном слое – $K_{\max} = 1,24$ ($t_{\max} = 16$ ч). Полное рассеяние происходит через 79 ч с момента выброса.

Площадь распространения загрязнения зависит от скорости ветра, выводящего течения на установившийся режим. С ростом W_{st} становятся больше скорости течений в установившемся режиме, в связи с этим увеличиваются площадь области загрязнения и время ее полного рассеяния. Согласно приведенным данным, в районе Восточно-Казантипского газового месторождения ($H = 10$ м) рассеяние примеси одного и того же объема происходит дольше, чем в центральной части моря ($H = 12$ м) и Таганрогском заливе ($H = 8$ м). Здесь также отмечается максимальная площадь распространения загрязнения. Наименьшие значения площади, охваченной загрязнением, и времени рассеяния примеси имеют место для источника, расположенного в Таганрогском заливе.

Выводы

Сформулируем основные результаты проведенного исследования:

- в поле стационарных течений переменный ветер того же направления, что и постоянный, приводит к изменению расположения областей максимальных сгонов и нагонов и увеличению скоростей течений, отмечающихся в стационарном режиме;
- чем больше скорость стационарного движения жидкости, тем больше площадь распространения примеси и время ее рассеяния;

– при одинаковом начальном объеме примеси во всех рассмотренных пунктах наибольшие параметры области загрязнения имеют место в районе Восточно-Казантипского газового месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Матишов Г.Г.* Закономерности экосистемных процессов в Азовском море. – М.: Наука, 2006. – 304 с.
2. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море.* – СПб.: Гидрометеоздат, 1991. – 234 с.
3. *Еремеев В.Н., Коновалов А.В., Манилюк Ю.В., Черкесов Л.В.* Моделирование длинных волн в Азовском море, вызываемых прохождением циклонов // *Океанология.* – 2000. – 40, №5. – С. 658 – 665.
4. *Фомин В.В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // *Науч. тр. Украинского научно-исследовательского гидрометеорологического института.* – Киев, 2002. – Вып. 249. – С. 246 – 255.
5. *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 // *Доповіді НАН України.* – 2007. – №3. – С. 112 – 117.
6. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Математическое моделирование эволюции примеси в Азовском море // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. – С. 230 – 239.
7. *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. 208.
8. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations. I. The basic experiment // *Mon. Wea. Rev.* – 1963. – 91, №2. – P. 99 – 164.
9. *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.
10. *Hsu S.A.* A mechanism for the increase of wind stress coefficient with wind speed over water surface: A parametric model // *Ibid.* – 1986. – 16. – P. 144 – 150.
11. *Иванов В. А., Фомин В. В., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Моделирование сгонно-нагонных явлений и трансформация поля примеси в Азовском море при наличии стационарных течений // *Морской гидрофизический журнал.* – 2008. – №4. – С. 52 – 68.
12. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том III. Азовское море.* – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 218 с.

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

Материал поступил
в редакцию 20.11.08
После доработки 13.03.09

АНОТАЦІЯ У роботі з використанням тривимірної нелінійної математичної моделі вивчаються явища згону-нагону і течії в Азовському морі, спричинені змінним вітром за наявності стаціонарних течій. Досліджені особливості трансформації домішки в акваторії Азовського моря при сумісній дії стаціонарного і нестаціонарного вітру. На підставі результатів чисельних розрахунків зроблені висновки про залежність часу розсіяння забруднень від швидкості вітру і розташування районів забруднень. Показано, що змінний вітер призводить до істотного збільшення відхилень рівня моря і площі розповсюдження забруднення в порівнянні з дією тільки стаціонарних течій.

ABSTRACT Surge phenomena and currents in the Azov Sea induced by variable wind in the presence of stationary currents are studied using three-dimensional non-linear mathematical model. Features of impurity transformation in the Azov Sea caused by time-variable wind are investigated. The results of numerical calculations permit to draw the conclusions on dependence of time of pollution dissipation upon wind speed and location of the polluted areas. It is shown that variable wind lead to significant increase of the sea level variation and growth of pollution propagation as compared to the effect of stationary currents only.