

Численный анализ воздействия динамических процессов на эволюцию загрязнений в Азовском море

На основе применения нелинейной трехмерной сигма-координатной модели исследуются волны, течения и эволюция пассивной примеси в Азовском море при наличии стационарных течений. Выполнен анализ физических закономерностей распространения пассивной примеси различной начальной площади в Азовском море с учетом стационарных течений различной интенсивности. Установлено, что двукратное увеличение начальной площади загрязнения приводит при наличии рассматриваемых атмосферных возмущений к увеличению на 58% наибольшей площади загрязнения по сравнению со случаем на «тихой воде». При этом с ростом начальной площади также увеличивается продолжительность полного рассеивания загрязнений.

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

В прибрежно-шельфовой зоне Азовского моря перенос и рассеивание загрязняющих веществ определяются течениями и волнами, генерируемыми воздействием ветра. Из перечисленных процессов наименее изучены течения ветрового происхождения и волны, формирующиеся в береговой зоне. В настоящее время накоплен достаточно большой опыт в исследовании этих процессов методами математического моделирования, но наблюдается несоответствие между уровнем знаний о динамике вод в прибрежно-шельфовой зоне Азовского моря и необходимостью эффективного прогнозирования возможных экологических изменений вследствие ее интенсивного экономического освоения, усиливающегося в последние годы.

Имеются публикации цикла работ, посвященных исследованию волн и течений для полей ветра, типичных для этого региона [1 – 3]. При изучении трансформации примеси в качестве генератора движения водной среды рассматривались постоянный ветер [1], осредненный на определенных промежутках времени [4], и атмосферные циклонические образования [5].

В данной работе методом математического моделирования исследуется влияние однородных по пространству и времени характерных для Азово-Черноморского региона ветров зональных направлений (северо-западного, западного и юго-западного) [6, 7] на трансформацию областей загрязнения различной начальной площади.

Постановка задачи. Граничные и начальные условия

Основу количественного описания прибрежной циркуляции составляют уравнения движения и неразрывности с использованием приближения гидро-

статика [8, 9]. Уравнения математической модели определены в терминах декартовой системы координат, в которой ось x направлена на восток, y – на север, z – вертикально вверх. В уравнениях модели и далее используются общепринятые обозначения: u, v, w – проекции скорости по осям x, y, z ; t – время; p – давление; ρ – плотность; g – ускорение свободного падения; f – параметр Кориолиса; $\zeta(x, y, t)$ – профиль свободной поверхности.

Коэффициент горизонтальной вязкости A_M вычисляется с использованием модели подсеточной вязкости [10] 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 [11, 12] имеют вид

$$K_M = qlS_M, \quad K_H = qlS_H. \quad (2)$$

Данная параметризация основана на решении двух дополнительных уравнений в частных производных для определения кинетической энергии турбулентности $q^2/2$ и макромасштаба турбулентности l :

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

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

Здесь $k = 0,4$ – постоянная Кармана; $\varepsilon_q = 0,2$; $P_s = qlS_z((u'_z)^2 + (v'_z)^2)$ – скорость генерации турбулентности за счет вертикального сдвига скорости течения, $S_z = A_2(1 - 6A_1/A_2)/(1 - (3A_2B_2 + 18A_1A_2)G_H)$, $G_H = -gl^2\rho_0^{-2}q^{-2}\partial\rho/\partial z$; $L = (\zeta - z)^{-1} + (H - z)^{-1}$; $A_1 = 0,92$, $A_2 = 0,74$, $B_1 = 16,6$, $B_2 = 10,1$, $E_1 = 1,33$, $E_2 = 0,025$, $E_3 = 0,08$ – эмпирические постоянные.

Граничные условия для решения уравнений (3), (4) имеют вид

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

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

где u_0, u_b – скорости в поверхностном и придонном слоях соответственно; $\tau_{0x} = C_a W_x |\mathbf{W}|$ 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 [13], который изменяется в зависимости от величины скорости ветра:

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

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, $z_0 = 0,003$ м – параметр шероховатости, характеризующий гидродинамические свойства подстилающей донной поверхности. На боковых границах выполняются условия прилипания.

В качестве начальных условий ($t = 0$) принимаются условия отсутствия 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 $C(x, y, z, t)$ используется 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 и K_H – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии соответственно. 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:

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

Загрязнение морской воды происходит после установления стационарных движений жидкости в море. Из [1, 3] известно, что это время тем больше, чем больше скорость действующего ветра. В связи с этим во всех численных

экспериментах время поступления загрязнения ($t_0 = 48$ ч) наступает при наибольшем значении скорости ветра. При этом начальная область загрязнения для всех рассматриваемых далее видов атмосферных возмущений расположена в поверхностном слое:

$$C_0(x, y, z, t_0) = \begin{cases} 1, & r \leq R, 0 \geq z \geq -z_1, \\ 0, & r > R, z < 0; r \leq R, z < -z_1, \end{cases} \quad (12)$$

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

В качестве параметров, характеризующих эволюцию пассивной примеси, выбраны время рассеивания примеси (t_d), коэффициент максимальной площади ее распространения на различных горизонтах (K_{\max}) и соответствующий этому момент времени (t_{\max}). При этом $K_{\max} = S_{\max}/S_0$, где S_0 – начальная площадь области загрязнения в поверхностном слое, S_{\max} – наибольшее значение этой площади на рассматриваемом горизонте в процессе трансформации примеси. Условием полного рассеивания загрязнения принимается величина его концентрации, не превышающая $C_d = 2,5 \cdot 10^{-2}$ во всей акватории моря.

Для численной реализации выполняется переход от координаты z к сигма-координате [1, 8, 14]. В этом случае алгоритм решения базируется на применении двухслойных разностных схем. Используются равномерные шаги по горизонтальным координатам $\Delta x, \Delta y$ и по сигма-координате.

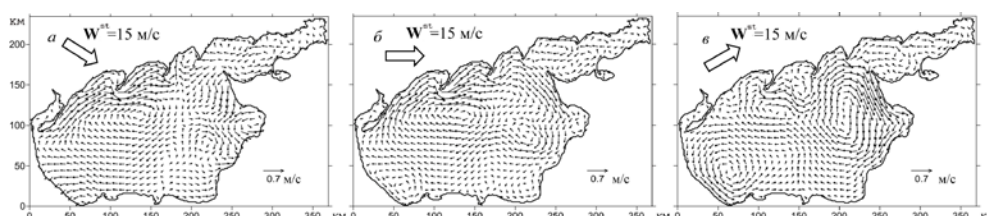
Пространственное разрешение модели по широте и долготе составляет $(1/59)^\circ \times (1/84)^\circ$, линейные размеры ячейки $\Delta x = \Delta y = 1,4$ км, количество узлов горизонтальной сетки равно 276×176 . Число расчетных уровней по вертикали 11. Уравнения интегрируются с шагом $\Delta t = 18$ с для определения осредненных двумерных компонент скорости и уровня моря и $\Delta t_d = 10\Delta t = 3$ 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 [15].

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

Анализ численных экспериментов

1. В первой серии численных экспериментов изучается влияние различных направлений и скоростей постоянного ветра на стгонно-нагонные процессы и течения. Вследствие относительно симметричной конфигурации берегов, весьма однородных глубин и небольших размеров моря характеристики волн при различных направлениях ветра меняются незначительно. При этом преобладают [6, 7] ветры зональных направлений (северо-западный, западный и юго-западный), которые в общей циркуляции атмосферы обуславливают обмен воздуха между различными широтами Земли.

На рис. 1 приведены поля скоростей стационарных течений в поверхностном слое моря в моменты времени, соответствующие различным ветровым режимам. Отсюда видно, что генеральная циркуляция вод, вызванная действием ветра зонального направления, характеризуется циклоническим движением. В квазистационарном состоянии главным структурным элементом движения является течение, опоясывающее прибрежный район моря шириной 50 – 60 км и характеризующееся направленностью на северо-запад. На удалении 20 – 35 км от берега прослеживается ядро наибольших скоростей (стрежень потока), достигающих в поверхностном слое моря 60 – 80 см/с.



Р и с. 1. Поля стационарных течений (м) Азовского моря, вызываемых действием постоянных ветров со скоростью 15 м/с: *a* – северо-западного; *б* – западного; *в* – юго-западного

В Таганрогском заливе (рис. 1) при интенсивных западных, северо-западных и юго-западных ветрах основное направление течений – восточное. Структура течений в заливе сохраняется во время действия полей ветра всех рассматриваемых направлений. Известно [7], что в центральной части моря с марта по ноябрь наиболее часто повторяются западные и юго-западные течения, более интенсивные, чем течения других направлений. В Таганрогском заливе чаще всего повторяются западные течения, при этом скорости и повторяемость течений других направлений намного меньше.

В табл. 1 на четырех глубинах приведены максимальные величины скоростей стационарных течений (U^{st}), вызванных постоянным ветром трех скоростей и трех характерных направлений. Из анализа этих данных следует, что наибольшие скорости движения жидкости в море достигаются при северо-западном ветре, наименьшие – при юго-западном. Так, при действии ветра максимальной скорости (W_3^{st}) величины U^{st} при северо-западном ветре больше, чем при западном в 1,12; 1,14; 1,29 и 1,21 раза на глубинах 1; 3; 5 и 10 м соответственно.

Превышение скоростей течений, возникающих при северо-западном ветре, составляет не более 16% относительно скоростей течений, вызванных западным ветром. При этом для данных скоростей и направлений ветра U^{st} убывают с ростом глубины на каждом из указанных интервалов не более чем на 5%.

Т а б л и ц а 1

Наибольшие значения скоростей стационарных течений (U^{st} , м/с) на различных горизонтах Азовского моря при различных скоростях и направлениях ветра

Горизонт, z (м)	$W_1^{st} = 5$ м/с			$W_2^{st} = 10$ м/с			$W_3^{st} = 15$ м/с		
	ЮЗ	З	СЗ	ЮЗ	З	СЗ	ЮЗ	З	СЗ
0	0,14	0,16	0,18	0,38	0,41	0,44	0,66	0,72	0,74
-3	0,11	0,13	0,15	0,31	0,34	0,37	0,54	0,61	0,62
-5	0,09	0,10	0,12	0,25	0,27	0,30	0,41	0,51	0,53
-10	0,07	0,08	0,10	0,18	0,20	0,22	0,32	0,37	0,39

Для рассматриваемых скоростей и направлений ветра и установившегося движения жидкости в табл. 2 приведены максимальные величины нагонов и сгонов на береговых станциях моря. Анализ этих величин свидетельствует о том, что ветер одного направления, но бóльшей скорости, увеличивает предельные значения сгонов и нагонов в 10,6 и 9,3 раза для скоростей 5 и 15 м/с соответственно.

Т а б л и ц а 2

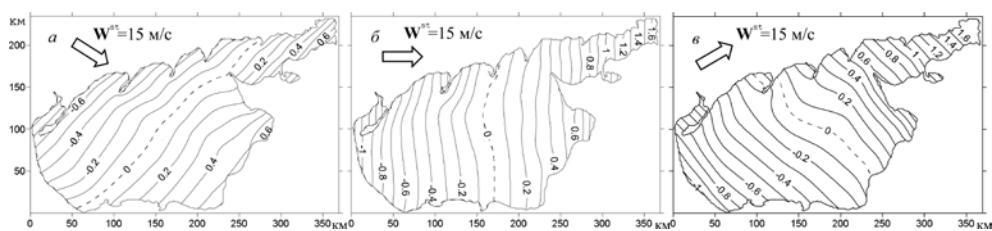
Максимальные нагоны и сгоны (см) на береговых станциях Азовского моря, вызванные постоянным ветром трех скоростей и направлений

Береговые станции	$W_1^{st} = 5$ м/с			$W_2^{st} = 10$ м/с			$W_3^{st} = 15$ м/с		
	ЮЗ	З	СЗ	ЮЗ	З	СЗ	ЮЗ	З	СЗ
Нагоны									
Геническ	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Бердянск	3	–	–	17	–	–	46	–	–
Мариуполь	13	10	–	53	41	–	119	88	–
Таганрог	22	21	6	94	84	25	204	180	52
Ейск	13	14	6	54	57	27	117	123	63
П.-Ахтарск	7	10	9	34	48	41	86	117	102
Темрюк	–	6	7	–	30	35	–	73	89
Опасное	–	4	5	–	17	28	–	41	72
Мысовое	–	–	4	–	–	18	–	–	47
Сгоны									
Геническ	9	12	8	41	57	39	96	139	101
Бердянск	–	4	6	–	20	29	–	47	78
Мариуполь	–	–	4	–	–	17	–	–	42
Таганрог	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ейск	–	–	–	–	–	–	–	–	–
П.-Ахтарск	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Темрюк	5	–	–	19	–	–	41	–	–
Опасное	6	–	–	26	–	–	59	–	–
Мысовое	8	6	–	38	29	–	92	65	–

Ветры одной и той же скорости, но различных направлений (от юго-западного к северо-западному) могут приводить к изменению районов максимальных значений нагонов. Так, постоянные юго-западный и северо-западный ветры со скоростью 15 м/с вызывают наибольшие нагоны на ст. Таганрог (204 см) и Приморско-Ахтарск (102 см) соответственно. В то же время под действием ветра рассматриваемых скоростей и направлений изменение районов максимальных сгонов не происходит. Во всех случаях наибольшие значения сгонов достигаются на ст. Геническ. Максимальная величина сгона (139 см) имеет место при западном ветре со скоростью 15 м/с.

Отметим также, что при ветрах одной и той же скорости, но разных направлений в одном и том же береговом районе могут быть и нагоны, и сгоны. На ст. Мариуполь (скорость ветра 15 м/с) возникают нагоны (119 и 88 см) при юго-западном и западном ветрах и сгон (42 см) – при северо-западном ветре.

Из анализа поведения представленных на рис. 2 изолиний уровня следует, что при ветре 15 м/с трех направлений в каждом случае имеет место одна узловая линия в центральном районе моря, ориентированная перпендикулярно направлению действующего ветра. К юго-западу от нее происходит повышение уровня, к северо-западу – понижение. Как видно (рис. 2, а, б), при юго-западном и западном ветрах область наименьших высот волн (узловая линия) располагается в центральной части моря с некоторым смещением к югу. При северо-западном ветре той же скорости изолинии уровня волн меняются мало, но область их наименьших значений несколько смещается в юго-западном направлении (рис. 2, в).



Р и с. 2. Изолинии уровня (м) Азовского моря при действии постоянных ветров со скоростью 15 м/с: а – северо-западного; б – западного; в – юго-западного

2. В следующей серии численных экспериментов поставим целью получить оценку влияния скорости и направления зональных ветров на трансформацию области загрязнения в центральном районе Азовского моря (A_0). Известно [16], что основными источниками поступления загрязняющих веществ в морскую среду являются реки, ливневые стоки и сточные коллекторы бытовых вод вблизи больших городов. Часть из них действует как непрерывные источники, остальные – в режиме мгновенных сбросов (например ливневые канализации).

Пусть в момент выброса загрязнения ($t_0 = 48$ ч) на поверхность моря центр области (12) находится в пункте A_0 с координатами $x_0 = 110$ км, $y_0 = 45$ км. Ее радиус при $t = t_0$ в каждом из трех рассматриваемых экспериментов принимаем равным 6,364; 9 и 12,728 км, площадь – $S_0/2$, S_0 и $2S_0$ соответ-

ственно ($S_0 = 254 \text{ км}^2$). Отметим, что скорости течений для всех рассматриваемых характеристик ветра при $t \geq t_0$ не зависят от времени.

Дальнейшее изменение концентрации загрязняющих веществ и занимаемой ими области определяется в основном течениями, существенно зависящими от характеристик действующего ветра. В численных экспериментах для изучения механизмов переноса и трансформации загрязняющих веществ используются поля постоянного ветра трех направлений, указанных в п. 1.

В табл. 3 приведены коэффициент максимального распространения области загрязнения (K_{\max}), время его достижения (t_{\max} , ч) и время полного рассеивания примеси (t_d , ч) на различных горизонтах для четырех скоростей ветра. Отметим, что здесь имеется в виду время, прошедшее с момента выброса загрязнения.

Т а б л и ц а 3

Параметры K_{\max} , t_{\max} (ч), t_d (ч) на различных горизонтах Азовского моря в зависимости от начальной площади загрязнения (γS_0 , $\gamma = 0,5; 1; 2$) и скорости ветра

γS_0	z, м	Параметры	$W_{0=0}$	$W_1^{\text{st}} = 5 \text{ м/с}$			$W_2^{\text{st}} = 10 \text{ м/с}$			$W_3^{\text{st}} = 15 \text{ м/с}$		
				ЮЗ	З	СЗ	ЮЗ	З	СЗ	ЮЗ	З	СЗ
$S_0/2$	0	K_{\max}	1,16	1,22	1,20	1,23	1,27	1,28	1,33	1,33	1,33	1,36
		t_{\max}	3,00	3,07	5,00	5,11	5,00	4,03	4,30	4,00	4,00	4,15
		t_d	15,00	14,02	14,00	14,25	14,00	14,10	14,30	14,00	14,08	14,39
	-H/2	K_{\max}	1,28	1,28	1,28	1,29	1,35	1,32	1,36	1,42	1,37	1,46
		t_{\max}	12,00	14,00	14,00	14,20	14,06	13,00	14,55	13,45	12,00	16,70
		t_d	35,00	31,00	31,00	31,17	30,83	31,00	31,42	30,42	32,00	34,70
	-H+h _b	K_{\max}	1,05	1,33	1,29	1,28	1,43	1,31	1,40	1,50	1,43	1,58
		t_{\max}	29,00	25,00	27,00	30,00	27,00	25,00	29,00	28,00	27,00	28,00
		t_d	45,00	49,00	52,00	53,00	48,00	51,00	49,00	47,00	51,00	52,00
S_0	0	K_{\max}	1,11	1,16	1,15	1,17	1,19	1,20	1,22	1,23	1,24	1,27
		t_{\max}	4,00	4,30	5,35	5,00	4,10	5,00	5,10	4,35	5,55	5,20
		t_d	15,00	49,56	52,04	53,00	49,32	51,00	50,39	47,99	51,00	52,49
	-H/2	K_{\max}	1,20	1,21	1,19	1,22	1,26	1,22	1,26	1,29	1,25	1,32
		t_{\max}	13,00	14,08	13,00	13,30	13,61	13,00	13,07	14,60	12,00	13,37
		t_d	39,00	34,10	35,00	40,49	32,08	33,00	34,30	31,45	32,00	31,43
	-H+h _b	K_{\max}	1,02	1,23	1,19	1,19	1,29	1,20	1,27	1,32	1,26	1,41
		t_{\max}	28,00	27,12	28,00	28,00	24,41	26,00	27,38	28,46	27,00	33,08
		t_d	50,00	54,30	58,00	57,00	54,20	57,00	55,37	53,02	56,00	51,18
$2S_0$	0	K_{\max}	1,08	1,11	1,10	1,12	1,13	1,13	1,15	1,15	1,16	1,18
		t_{\max}	3,00	3,08	5,00	3,17	4,00	4,00	4,08	4,00	4,02	3,34
		t_d	15,00	16,09	16,00	16,13	16,00	16,00	16,23	16,00	16,13	16,09
	-H/2	K_{\max}	1,13	1,14	1,13	1,14	1,16	1,14	1,17	1,19	1,17	1,21
		t_{\max}	13,00	13,07	14,00	12,04	12,21	13,00	14,26	12,22	13,00	14,64
		t_d	71,00	38,06	48,00	51,09	36,03	37,00	38,20	35,01	35,00	34,01
	-H+h _b	K_{\max}	1,00	1,13	1,11	1,11	1,15	1,12	1,17	1,17	1,15	1,26
		t_{\max}	26,00	28,25	26,00	28,00	25,14	25,00	27,40	28,27	27,00	29,89
		t_d	55,00	61,31	63,00	60,00	60,03	62,00	61,09	58,05	60,00	55,30

Из анализа этих данных следует, что на свободной поверхности с увеличением скорости ветра площадь, занимаемая примесью, увеличивается, а время достижения ее наибольшего распространения уменьшается. В численном эксперименте с наименьшей начальной площадью загрязнения $S_0/2$ при скорости ветра 5 м/с максимум этой площади (1,23) достигается в 5,11 ч, при скорости ветра 10 м/с (1,33) – в 4,30 ч, при скорости ветра 15 м/с (1,36) – в 4,15 ч. Отметим, что северо-западное направление ветра сильнее влияет на величину максимума площади примеси и время ее рассеивания по сравнению с юго-восточным и западным направлениями. Так, при северо-западном ветре время полного рассеивания примеси в поверхностном слое увеличивается с ростом его скорости (5, 10, 15 м/с) и принимает значения 14,25; 14,3 и 14,4 ч соответственно.

Через 4 ч после выброса примеси на поверхность моря происходит ее проникновение на глубину $z = -H/2$, где $H = 12$ м – глубина моря в районе выброса. С течением времени постепенно увеличивается площадь области загрязнения на этом горизонте от нуля до наибольшего значения.

В этом же численном эксперименте ($S_0/2$) при всех значениях скорости ветра наибольшая площадь распространения загрязнения имеет место при северо-западном ветре, она составляет 1,29 (W_1^{st}), 1,36 (W_2^{st}) и 1,46 (W_3^{st}). Растет также и время ее достижения: 14,20; 14,55 и 16,7 ч (табл. 3). С ростом начальной площади загрязнения увеличивается и время его полного рассеивания. На «тихой воде» ($W_0 = 0$) t_d принимает значения 45; 50 и 55 ч для $S_0/2$, S_0 , $2S_0$ соответственно. При наличии атмосферных возмущений (W_k^{st} , $k = 1, 2, 3$) t_d возрастает следующим образом: 53; 58 и 63 ч для $S_0/2$, S_0 , $2S_0$ соответственно.

Проведем исследование влияния изменения скоростей ветра одних и тех же направлений на размеры областей загрязнения одинаковой начальной площади, используя данные численных экспериментов, представленных в табл. 3. В результате видим, что наименьшие из указанных параметров распространения примеси имеют место при отсутствии ветра, наибольшие – при ветрах самой большой из рассматриваемых скорости (15 м/с).

Выполним сравнение времени рассеивания t_d и максимумов размеров занимаемых примесью областей K_{max} в зависимости от начальной площади загрязняющих веществ (γS_0 , $\gamma = 1/2, 1, 2$). Анализ результатов численных экспериментов по выявлению закономерностей переноса и распространения примеси показал, что начальные размеры областей загрязнений мало влияют на характер их горизонтальных и вертикальных трансформаций. Для оценки интенсивности эволюции примеси рассмотрен эксперимент с северо-западным ветром со скоростью 15 м/с. В этом случае при увеличении начальной площади загрязнения ($S_0/2$, S_0 , $2S_0$) в поверхностном слое моря K_{max} принимает значения 1,36; 1,27 и 1,18. На глубине $z = -H/2$ с ростом начальных площадей

K_{\max} также убывает на 9,6% (S_0) и 17,1% ($2S_0$). В придонном слое K_{\max} уменьшается на 10,7 и 20,2% соответственно.

При исследовании влияния размеров начального загрязнения на продолжительность его полного рассеивания найдено (табл. 3), что наибольшее время рассеивания имеет место при юго-западном ветре со скоростью 5 м/с. При этом в придонном слое ($z = -H + h_b$) с ростом начальных площадей t_d увеличивается на 11 и 25% и составляет 49 ч ($S_0/2$), 54,3 ч (S_0), 61,3 ч ($2S_0$).

Анализ данных, представленных в табл. 3, приводит к следующему выводу: наибольшая площадь загрязнения по отношению к площади начального загрязнения увеличивается на 28% на «тихой воде» и на 58% – при наличии рассматриваемых атмосферных возмущений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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: МГИ НАН Украины, 2010. – 178 с.
2. *Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Атлас сгонно-нагонных процессов, волн и течений, вызываемых действием атмосферных возмущений в Азовском море. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2012. – 96 с.
3. *Шульга Т.Я.* Течения и сгонно-нагонные процессы, вызываемые переменным по пространству и времени ветром в Азовском море // Доп. НАН України. – 2011. – № 2. – С. 121 – 124.
4. *Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование влияния переменного по пространству и времени ветра на течения, сгонно-нагонные процессы и распространение примеси в Азовском море // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 8. – С. 69 – 79.
5. *Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование зависимости эволюции примеси от начального распределения ее концентрации и параметров циклона // Морской гидрофизический журнал. – 2012. – № 5. – С. 24 – 33.
6. *Доценко С.Ф., Иванов В.А.* Природные катастрофы Азово-Черноморского региона. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – 174 с.
7. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море.* Справочное издание. Проект «Моря СССР». – СПб.: Гидрометеониздат, 1991. – 234 с.
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. – 4. – P. 1 – 16.
9. *Черкесов Л.В., Иванов В.А., Хартиев С.М.* Введение в гидродинамику и теорию волн. – СПб.: Гидрометеониздат, 1992. – 264 с.
10. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment // Mon. Weat. Rev. – 1963. – 91, № 3. – P. 99 – 164.
11. *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.
12. *Rodi W.* Turbulence Models and Their Application in Hydraulics // IAHR Monograph Ser. – Balkema, The Netherlands. – 1993. – 116 p.

13. Wannawong W., Humphries U.W., Wongwises P. et al. Mathematical Modeling of Storm Surge in Three Dimensional Primitive Equations // Int. J. Comp. Math. Sci. – 2011. – № 5. – P. 44 – 53.
14. Фомин В.В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ. – 2002. – Вып. 249. – С. 246 – 255.
15. Courant R., Friedrichs K.O., Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics // IBM J. – 1967. – March. – P. 215 – 234.
16. *Геоэкология шельфа и морских берегов морей России* / Под ред. Н.А. Айбулатова. – М.: Ноосфера, 2001. – 428 с.

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

Материал поступил
в редакцию 20.02.14

АНОТАЦІЯ На основі застосування нелінійної тривимірної сигма-координатної моделі досліджуються хвилі, течії та еволюція пасивної домішки в Азовському морі за наявності стаціонарних течій. Виконано аналіз фізичних закономірностей розповсюдження пасивної домішки різної початкової площі в Азовському морі з урахуванням стаціонарних течій різної інтенсивності. Встановлено, що двократне збільшення початкової площі забруднення призводить за наявності даних атмосферних збурень до збільшення на 58% найбільшої площі забруднення в порівнянні з випадком на «тихій воді». При цьому із зростанням початкової площі також збільшується тривалість повного розсіювання забруднень.

Ключові слова: сигма-координатна модель, динамічні процеси, процеси згону-нагону, стаціонарні течії, пасивна домішка, приводний вітер.

ABSTRACT Waves, flows, and evolution of passive impurity in the Sea of Azov are studied at presence of stationary currents based on application of nonlinear three-dimensional sigma-meson-coordinate model. Physical regularities of distribution of passive impurity of different initial area in the Sea of Azov are analyzed taking into account stationary flows of various intensity. It is found that double increase of contamination initial area results in growth (at presence of the examined atmospheric disturbances) of the contamination largest area by 58% as compared to the case on “quiet water”. At that growth of contamination initial area is accompanied by increase of duration of its complete dispersion.

Keywords: sigma-coordinate model, dynamic processes, surge processes, stationary currents, passive impurity, surface wind.