

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

Исследование эволюции поля примеси в Азовском море при наличии стационарных течений

The numerical analysis of the sea level elevation, time of admixture total dissipation, maximal polluted area, and transformation of admixture spots in the presence of stationary currents in the Sea of Azov is carried out.

Азовское море обладает уникальными биоресурсами и значительным рекреационным потенциалом, испытывает сильное антропогенное воздействие, связанное как с водопользованием в регионе, так и с интенсификацией нефтегазодобывающих работ в юго-западной части моря. Изучению сгонно-нагонных явлений и эволюции примеси в Черном и Азовском морях при отсутствии стационарных течений посвящен ряд работ [1–4]. В настоящем сообщении методом численного моделирования с использованием трехмерной нелинейной математической модели исследуется влияние однородного по пространству и меняющегося во времени ветра на трансформацию локальных областей загрязнения в Азовском море при наличии стационарных течений. Также анализируются сгонно-нагонные явления и скорости течений, вызванные различными ветровыми ситуациями, дается оценка области применимости линейного приближения.

1. В качестве исходных принимаются нелинейные уравнения движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды и уравнение переноса-диффузии для концентрации примеси (C), состоящей из частиц одного типа [2, 5–7]. На свободной поверхности выполняются кинематическое и динамические условия, а также условие отсутствия потока примеси [2]. На дне ($z = -H(x, y)$) поток примеси и нормальная составляющая скорости равны нулю. Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [5], на боковых границах выполняются условия прилипания [6]. В начальный момент времени движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна, концентрация примеси равна нулю.

Область загрязнения в момент выброса ($t = t_0$) имеет вид пятна радиуса R толщиной z_1 :

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

где r — расстояние от центра области загрязнения до точки, в которой вычисляется концентрация; z_1 — толщина верхнего расчетного слоя.

В исходных уравнениях, граничных и начальных условиях осуществляется переход от координаты z к координате σ [2, 4, 7]. Численный алгоритм решения по времени базируется на применении двухслойных схем [7]. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществлялся в соответствии с критерием устойчивости Куранта для баротропных волн [5].

2. Для нахождения основных закономерностей динамики ветровых течений, а также скорости и направления переноса примеси рассматривается однородный по пространству

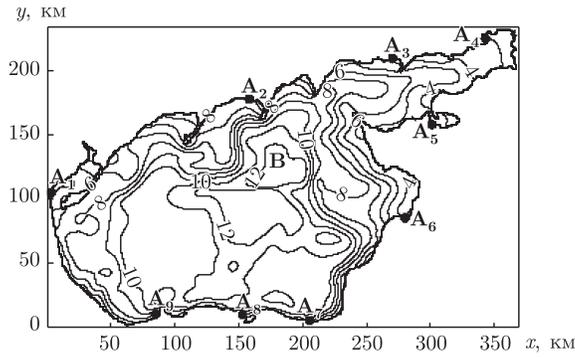


Рис. 1. Рельеф дна (м) Азовского моря, положение прибрежных пунктов и центра области загрязнения (В) при $t = 40$ ч

и переменный во времени ветер. Как известно [8] (данные 18 тыс. экспедиционных наблюдений), на периферии циклонов, проходящих над Украиной, возникают штормовые ветры над акваторией моря, направленные с запада на восток.

В качестве действующего ветра выбран западный ветер ($W_x \neq 0, W_y = 0$), скорость которого изменяется по следующему закону. В начальный момент времени ($t = 0$) вода находится в состоянии покоя, уровень горизонтален, а скорость ветра нулевая. При $t > 0$ на водную поверхность начинает действовать ветер заданного (постоянного) направления, скорость которого нарастает со временем ($0 < t \leq t_1$) по линейному закону. При $t = t_1$ скорость ветра в каждой точке акватории достигает своего максимального значения и далее ($t > t_1$) не меняется. Таким образом, скорость ветра ($W_x = U$) задается следующим соотношением:

$$U_i(t) = \begin{cases} a_i t, & 0 < t \leq t_1, \\ a_i t_1, & t > t_1. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $t_1 = 3$ ч, $a_i t_1 = \max U_i = U_i^0$ ($i = \overline{1,4}$) — максимальная скорость ветра, м/с: $U_1^0 = 5$, $U_1^0 = 10$, $U_2^0 = 15$, $U_3^0 = 20$.

Отклонения свободной поверхности отмечаются на береговых станциях Азовского моря (рис. 1): **A₁** — Геничеськ, **A₂** — Бердянськ, **A₃** — Мариуполь, **A₄** — Таганрог, **A₅** — Ейськ, **A₆** — Приморсько-Ахтарськ, **A₇** — Темрюк, **A₈** — Опасное, **A₉** — Мысьовое. Выброс загрязнения (1) происходит в момент выхода течений, генерируемых ветром (2), на установившийся режим ($t = t_0$) в виде области радиуса $R = 9$ км, занимающей площадь S_0 с концентрацией, равной единице. Центр выброса загрязнения (пункт **B**) показан на рис. 1. Это самая глубоководная часть моря. Для расчета трансформации области загрязнения вследствие процессов адвекции и диффузии были выбраны следующие значения коэффициентов горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии: $A_H = 10$ м²/с, $K_H = 10^{-4}$ м²/с [9].

3. Определим время выхода (t_0) течений на установившийся режим. Степень приближения к данному режиму оценим по относительным изменениям полной энергии $E_s(t)$, которую находим как сумму осредненных по пространству кинетической $E_k(t)$ и потенциальной $E_p(t)$ энергий. Изменение E_s определим по формуле: $\delta E_s^n = |E_s^{n+1} - E_s^n|/E_s^n$, где n — номер шага по времени. Считаем, что стационарный режим достигается, когда $\delta E_s \leq 10^{-2}$. Исходя из этого, время выброса загрязнения принимаем равным 40 ч ($t_0 = 40$ ч).

Скорость установившихся течений в момент времени $t = t_0$ уменьшается с глубиной и составляет: при U_1^0 0,16 м/с ($z = 0$); 0,13 м/с ($z = -3$ м); 0,12 м/с ($z = -5$ м) и 0,09 м/с

($z = -10$ м); при U_2^0 0,49 м/с ($z = 0$); 0,44 м/с ($z = -3$ м); 0,41 м/с ($z = -5$ м) и 0,29 м/с ($z = -10$ м); при U_3^0 1,06 м/с ($z = 0$); 0,97 м/с ($z = -3$ м); 0,91 м/с ($z = -5$ м) и 0,64 м/с ($z = -10$ м); при U_4^0 1,77 м/с ($z = 0$); 1,64 м/с ($z = -3$ м); 1,54 м/с ($z = -5$ м) и 1,09 м/с ($z = -10$ м). Из приведенных данных следует, что наибольшая скорость течений в море устанавливается при максимальной скорости ветра 20 м/с.

В серии численных экспериментов оценим, как влияет на результаты расчетов линеаризация исходных уравнений и граничных условий. Для этого сравним варианты решений, полученные при линейном (L) и нелинейном (NL) моделировании. Величину относительного отклонения решений ($\delta\Lambda$) для рассчитываемых параметров (Λ) находим из соотношения:

$$\delta\Lambda = 100 \cdot |\Lambda^{NL} - \Lambda^L|/|\Lambda^{NL}|.$$

Рассмотрим особенности временной эволюции примеси и время ее полного рассеяния. Для решения этой задачи считаем время выхода течений на установившийся режим ($t = t_0$) началом отсчета. Полагаем загрязнение рассеявшимся при условии, что максимум концентрации (C_d) будет равным $2,5 \cdot 10^{-2}$. Проанализируем, как изменяется полный объем загрязнения и площадь загрязнения с течением времени на горизонтах: $z = 0$, $z = -H/2 = h_1$, $z = -H + z_2 = h_2$. Здесь z_2 — шаг по вертикали в придонном слое. Введем две безразмерные величины K_{\max} и N_{\max} для оценки наибольших значений площади и объема загрязнения. Коэффициент K_{\max} 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 $t = t_0$ ($K_{\max} = S_{\max}/S_0$). Величина N_{\max} вычисляется как отношение максимального объема (V_{\max}), ограниченного поверхностью с концентрацией примеси C_d , в момент времени $t = t_{\max}$ к объему первоначального загрязнения V_0 , рассчитанному как произведение площади S_0 на толщину слоя z_1 ($N_{\max} = V_{\max}/V_0$).

Из анализа данных, приведенных в табл. 1, видно, что при нелинейном моделировании с увеличением максимальной скорости ветра в 4 раза (от $U_1^0 = 5$ до $U_4^0 = 20$ м/с) максимальная площадь загрязнения увеличивается в 1,1–1,2 раза на различных глубинах моря, а при линейном в 1,2–1,8 раза. Относительное отклонение результатов линейного и нелинейного моделирования увеличивается с ростом максимальной скорости ветра. Так, при

Таблица 1. Максимальные значения K_{\max} , N_{\max} , время их достижения t_{\max} , время полного рассеяния примеси t_d на различных глубинах моря для четырех значений максимальной скорости ветра ($U_1^0 = 5$ м/с, $U_2^0 = 10$ м/с, $U_3^0 = 15$ м/с, $U_4^0 = 20$ м/с), полученные при линейном и нелинейном моделировании

Максимальные значения K , N , t		U_1^0		U_2^0		U_3^0		U_4^0	
		L	NL	L	NL	L	NL	L	NL
$z = 0$	K_{\max}	1,15	1,14	1,24	1,18	1,30	1,20	1,42	1,22
	t_{\max} , ч	4,3	5,4	3,1	4,4	2,9	4,5	3,9	4,2
	t_d , ч	17,1	17,4	17,2	17,5	17,3	17,6	17,4	17,8
$z = h_1$	K_{\max}	1,23	1,16	1,37	1,19	1,74	1,23	2,15	1,27
	t_{\max} , ч	12,4	14,1	13,8	14,7	10,2	13,2	11,3	14,9
	t_d , ч	32,2	35,9	32,7	36,4	35,7	36,4	36,1	37,6
$z = h_2$	K_{\max}	1,17	1,16	1,35	1,18	1,73	1,22	2,06	1,26
	t_{\max} , ч	25,3	26,5	24,1	24,8	24,2	26,4	21,2	28,8
	t_d , ч	37,4	52,7	38,9	55,1	49,1	57,5	46,0	60,7
	N_{\max}	11,29	11,06	11,81	11,07	13,59	11,14	15,43	11,23
	t_{\max} , ч	14,2	14,8	14,0	14,4	14,4	13,9	13,2	14,1
	t_d , ч	37,6	39,1	49,4	55,2	49,1	57,7	46,1	60,8

оценке K_{\max} для рассматриваемых значений U_i^0 ($i = \overline{1,4}$) величина δK_{\max} с увеличением U_i^0 составляет соответственно: на свободной поверхности 0,9; 4,4; 8,3 и 16,7%; на глубине $z = h_1$ 6; 16,6; 42,8; 71,4%; на глубине $z = h_2$ 0,9; 13,4; 40,6; 62,1%.

Период времени, в течение которого область загрязнения становится максимальной, с увеличением U_i^0 уменьшается (от 3 до 1 ч). Для каждого из рассматриваемых значений максимальной скорости ветра наибольший коэффициент загрязнения имеет место на горизонте $z = h_1$, а наименьший — на свободной поверхности. Величина относительных отклонений значений моментов времени (δt_{\max}) на глубине $z = h_1$ составляет: 12% (U_1^0); 6,1% (U_2^0); 20,4% (U_3^0) и 24,1% (U_4^0). Таким образом, отклонения значений t_{\max} , превышающие 7%, отмечаются при скоростях ветра 15 и 20 м/с.

Значительная разница результатов, полученных при линейном и нелинейном моделировании, имеет место для времени полного рассеяния площади загрязнения на глубине $z = h_1$. При этом величина относительных отклонений значений моментов времени (δt_d), отвечающих условию $K(t_d) = 0$, на этой глубине составляет: 5,2% (U_1^0), 8,5% (U_2^0), 26,4% (U_3^0) и 40% (U_4^0). Следовательно, отклонение результатов линейного от нелинейного моделирования составляет менее 11% в случае, когда максимальная скорость ветра не превышает 10 м/с. С увеличением максимальных значений скорости ветра время полного рассеяния загрязнения на различных глубинах возрастает (от 24 мин до 8 ч).

Проанализируем теперь относительные изменения объемов загрязнения при тех же скоростях ветра. Из табл. 1 следует, что δN_{\max} равняется 2,1% при U_1^0 ; 6,7% при U_2^0 ; 21,9% при U_3^0 и 37,4% при U_4^0 . Время достижения максимального объема загрязнения (t_{\max}) отличается при линейном и нелинейном моделировании на 4,0% (U_1^0); 2,7% (U_2^0); 3,5% (U_3^0) и 6,3% (U_4^0). Относительные отклонения моментов времени, отвечающих условию $N(t_d) = 0$, соответственно равны: 3,8% (U_1^0); 10,5% (U_2^0); 14,2% (U_3^0) и 24,1% (U_4^0). Таким образом, для указанных параметров (N_{\max} , t_{\max} , t_d) линеаризация модели правомерна при максимальных скоростях ветра, не превышающих 10 м/с.

Оценим далее влияние двух подходов моделирования на максимумы сгонов и нагонов, формируемых западным ветром, для четырех значений его максимальной скорости в пунктах побережья Азовского моря. Анализ расчетов, выполненных с использованием линейной и нелинейной моделей, свидетельствует о том, что под действием ветра происходит постепенное повышение уровня у наветренных берегов (нагон) и понижение у подветренных (сгон). Характерной особенностью хода уровня на береговых станциях является появление подъема уровня на станциях: **A₃** — **A₈** и понижение в пунктах **A₁**, **A₂**, **A₉**, наблюдаемое в установившемся режиме ($t \geq t_0$).

Из анализа данных, приведенных в табл. 2, следует, что ветер западного направления генерирует нагоны и сгоны, величина которых зависит от его максимальной скорости. Результаты линейного и нелинейного моделирования для максимальной скорости ветра 5 м/с отличаются менее чем на 0,5%. Наибольшие нагоны для ветра с максимальными скоростями 5, 10, 15 и 20 м/с отмечаются в одном и том же пункте **A₄** (Таганрог) и составляют для линейного решения 0,17 м (U_1^0); 0,63 м (U_2^0); 1,74 м (U_3^0) и 3,74 м (U_4^0) для нелинейного 0,17 м (U_1^0); 0,6 м (U_2^0); 1,42 м (U_3^0) и 2,54 м (U_4^0). Отсюда следует, что отклонения результатов становятся большими при больших максимальных скоростях ветра. Отметим, что наибольшее значение $\delta \zeta$ при рассматриваемых максимальных скоростях ветра соответственно равно 0,5; 7; 22,9 и 48%. Таким образом, отклонение решений задачи о максимальных сгонах и нагонах, полученных в линейном и нелинейном случаях, не превышают 10% только при $U_1^0 = 5$ и $U_2^0 = 10$ м/с.

Таблица 2. Максимальные значения сгонов и нагонов (см) на береговых станциях для максимальных скоростей ветра ($U_1^0 = 5$ м/с, $U_2^0 = 10$ м/с, $U_3^0 = 15$ м/с, $U_4^0 = 20$ м/с) и отклонение результатов (δ , %), полученных при линейном и нелинейном моделировании

Береговые станции	U_1^0		U_2^0		U_3^0			U_4^0		
	NL	L	NL	δ	L	NL	δ	L	NL	δ
Геничск	-10	-40	-39	4,4	-120	-104	14,5	-266	-210	26,5
Бердянск	-34	-14	-13	4,9	-142	-136	18,3	-95	-68	39,9
Мариуполь	8	30	29	2,3	83	70	18,0	177	128	28,4
Таганрог	17	63	60	5,1	174	142	22,9	374	254	47,0
Ейск	10	39	38	3,9	110	91	20,5	239	170	40,6
Приморско-Ахтарск	9	36	34	6,8	110	92	19,8	248	179	38,5
Темрюк	5	22	21	7,0	68	57	20,7	154	109	42,0
Опасное	3	13	12	5,9	39	32	21,3	89	60	48,0
Мысовое	-5	-20	-19	3,4	-55	-52	5,8	-119	-96	23,3

Анализ максимальных скоростей течений в Азовском море, генерируемых переменным ветром, показывает, что в зависимости от способов моделирования наибольшие относительные отклонения максимумов скорости течений имеют следующие значения: 6,25% (U_1^0); 32,7% (U_2^0); 72,8% (U_3^0) и 122% (U_4^0). Следовательно, линейное решение для максимальной скорости ветра 10 м/с и более отличается от нелинейного не менее чем на 33%.

1. Коротенко К. А., Дитрих Д. Е., Боуман М. Дж. Моделирование циркуляции и переноса нефтяных пятен в Черном море // *Океанология*. – 2003. – **43**, № 4. – С. 504–515.
2. Алексеев Д. В., Иванов В. А., Иванча Е. В., Фомин В. В., Черкесов Л. В. Исследование эволюции трехмерной структуры поля примеси на северо-западном шельфе Черного моря при прохождении циклонов // *Метеорология и гидрология* – 2006. – № 1. – С. 86–94.
3. Букатов А. Е., Завьялов Д. Д., Соломаха Т. А. Численное моделирование динамики Азовского моря при сгонно-нагонных явлениях // Там же. – 2006. – № 6. – С. 69–75.
4. 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.
5. 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. – No 4. – P. 1–16.
6. Черкесов Л. В., Иванов В. А., Хартиев С. М. Введение в гидродинамику и теорию волн. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. – 264 с.
7. Фомин В. В. Применение схем TVD для численного моделирования фронтальных зон солености в мелком море // *Метеорология и гидрология*. – 2006. – № 2. – С. 59–68.
8. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР*. Т. 3: Азовское море. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. – 218 с.
9. Демьшев С. Г., Кныш В. В., Кортаев Г. К. Численное моделирование сезонной изменчивости гидрофизических полей Черного моря // *Мор. гидрофиз. журн.* – 2002. – № 3. – С. 12–26.

Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь

Поступило в редакцию 30.01.2007