

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

## Моделирование распространения примеси и сгонно-нагонных явлений, вызываемых переменным ветром в Азовском море

*З використанням тривимірної нелінійної математичної моделі було вивчено згінно-нагонні явища і течії в Азовському морі, що викликані мінливим вітром з урахуванням наявності стаціонарних течій. Досліджено особливості трансформації домішок в акваторії Азовського моря при сумісній дії стаціонарного й нестаціонарного вітру. На підставі результатів математичних розрахунків дійшли висновку про залежність часу розсіювання забруднень від швидкості вітру та розташування центрів забруднень. Показано, що мінливий вітер спричинює суттєве збільшення відхилень рівня і площ поширення забруднень у порівнянні з дією тільки стаціонарних течій.*

В настоящее время математическое моделирование стало одним из важнейших направлений в исследовании динамических процессов в реальных морских бассейнах. Это связано с недостатком имеющихся данных наблюдений, с необходимостью описания возможных экстремальных ситуаций гидрометеорологической природы, обеспечения экологической безопасности региона. Азовское море, несмотря на свои небольшие размеры, имеет важное народнохозяйственное значение. Оно отличается высокими рыбными запасами, месторождениями лечебных грязей и минеральных вод, которые обуславливают использование моря в лечебно-курортных и рекреационных целях, а также является важным звеном транспортного сообщения между портами Волжско-Камского и Азово-Черноморского бассейнов.

Численное моделирование позволяет глубже понять взаимосвязи между сезонными изменениями атмосферных возмущений и динамическими процессами в Азовском море. В публикации [1] с использованием двухмерных уравнений мелкой воды приведен анализ длинноволновых возмущений, вызванных прохождением циклонов над Азовским морем. Исследования времени полного рассеяния примеси, максимальной площади загрязнения и трансформации областей загрязнения под действием только переменного по времени ветра выполнены в работе [2]. Отметим, что в указанных работах не учитывается наличие стационарных течений.

В настоящем сообщении с использованием трехмерной нелинейной математической модели анализируются динамические процессы, возникающие в Азовском море под действием переменного по времени ветра при наличии стационарных течений. Приведены результаты анализа влияния стационарных течений на трансформацию примеси для различных параметров переменного ветра.

1. В качестве исходных принимаются полные нелинейные уравнения движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [3, 4]. На свободной поверхности удовлетворяются кинематическое и динамические условия. На дне моря ( $z = -H(x, y)$ ) нормальная составляющая скорости равна нулю. Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [4], на боковых границах

выполняются условия прилипания. В начальный момент времени ( $t = 0$ ) движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна.

Над Азовским морем, начиная с  $t = 0$ , действует постоянный ветер, генерирующий стационарные течения. Установившийся режим течения обусловлен однородным по пространству ветром, скорость которого ( $\mathbf{W}_{st}$ ) первые 3 ч нарастает со временем по линейному закону и далее не меняется. Момент времени выхода течений на установившийся режим ( $t = t_0$ ) определяем из условия: относительные изменения полной энергии, осредненной по объему моря на смежных шагах по времени, не превосходят 1%. Этот момент времени считаем началом действия переменного ветра и выброса загрязнения. При  $t = t_0$  над Азовским морем в поле стационарного ветра возникает переменный ветер, его скорость линейно возрастает и через 3 ч в каждой точке акватории моря достигает своего наибольшего значения, далее в течение 12 ч не изменяется и следующие 3 ч линейно убывает до нуля.

При  $t = t_0$  область загрязнения (с концентрацией, равной единице) расположена в поверхностном слое и имеет вид цилиндра радиусом  $R$  и высотой, соответствующей толщине верхнего расчетного слоя. Загрязнение 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 [4]. На боковых границах, свободной поверхности и на дне моря выполняется условие отсутствия потока примеси в направлении внешней нормали  $\mathbf{n}$ .

В исходных уравнениях, граничных и начальных условиях осуществляется переход от координаты  $z$  к координате  $\sigma$  [3, 4]. Численный алгоритм решения по времени базируется на применении двухслойных разностных схем. При выборе шагов интегрирования по временным и пространственным координатам используем критерий устойчивости Куранта для баротропных волн. Рельеф дна и конфигурация береговой линии Азовского моря в узлах сетки сняты с навигационных карт.

**2.** Сезонные изменения погоды в районе Азовского моря формируются под влиянием крупномасштабных синоптических процессов: в осенне-зимнее время на море воздействует отрог сибирского антициклона, в весенне-летнее — отрог азовского максимума [5, 6]. В численных расчетах выход течений на установившийся режим отмечается при постоянном западном ветре, скорость которого изменяется в пределах 5–15 м/с ( $\mathbf{W}_{st}^1 = 5$ ;  $\mathbf{W}_{st}^2 = 10$ ;  $\mathbf{W}_{st}^3 = 15$  м/с). Для нестационарного западного ветра ( $\mathbf{W}_{var}$ ), продолжительность действия которого 18 ч, на промежутке времени  $3 \text{ ч} < t_1 \leq 12 \text{ ч}$  ( $t_1 = t - t_0$ ) наибольшая скорость принималась равной 5 м/с и 10 м/с.

В первой серии численных экспериментов исследуется влияние различных параметров постоянного и нестационарного ветра на отклонения уровня и поля скорости течений. Для стационарного режима характерно преобладающее направление течений в сторону действующего ветра и только в центральной части моря течения отклоняются на  $40\text{--}50^\circ$  от него. С началом действия нестационарного ветра структура установившихся течений изменяется. Их направление через 15 ч ( $t = t_0 + 15$  ч) во всей акватории моря ориентировано на восток, заметно увеличивается скорость, наибольшее ее значение отмечается в Таганрогском заливе. Спустя 12 ч, после прекращения действия переменного ветра ( $t = t_0 + 30$  ч), вдоль побережья и в Таганрогском заливе преобладает направление течений в сторону стационарного ветра, в центральной части моря возникает антициклонический вихрь. При этом скорость течений существенно уменьшается.

В указанном режиме имеет место понижение уровня воды вдоль западного побережья (сгоны) и повышение — вдоль восточного берега (нагоны). Узловая линия пересекает цен-

тральную часть моря, она ориентирована перпендикулярно направлению ветра. Через 15 ч, после начала действия переменного ветра, узловая линия повернута по часовой стрелке на запад вокруг центральной области моря. Зоны сгона и нагона сохраняются в тех же областях моря, что и в установившемся режиме, при этом величина сгонов и нагонов существенно возрастает. С прекращением действия нестационарного ветра в центральной части моря отмечается понижение уровня воды, а в западной и восточной областях — повышение. Последствия, вызванные переменным ветром, слабо сказываются на изменениях полей уровня в Таганрогском заливе, которые мало отличаются от колебаний в данном режиме.

Максимумы нагонов и сгонов на береговых станциях Азовского моря, приведенные в табл. 1, отмечаются при совместном воздействии постоянного и переменного ветра в зависимости от его скорости. В верхней части таблицы даны значения нагонов, в нижней — сгонов. Отсюда следует, что наибольшие нагоны, генерируемые системой ветров западного направления, отмечаются на станции Таганрог. Их величина тем больше, чем больше скорости полей ветра  $\mathbf{W}_{st}$  и  $\mathbf{W}_{var}$ . Так, в стационарном режиме нагоны здесь составляют 20,7 ( $\mathbf{W}_{st}^1$ ); 77,4 ( $\mathbf{W}_{st}^2$ ) и 170,9 см ( $\mathbf{W}_{st}^3$ ), т. е. при большей в 2 и в 3 раза скорости ветра максимум нагонов возрастает в 3,7 и в 8,3 раза. В результате совместного воздействия переменного и постоянного ветра наибольшие отклонения уровня становятся больше, чем в установившемся режиме. Для Таганрога имеет место увеличение нагонов в 2,6 раза при  $\mathbf{W}_{var} = 5$  м/с и в 3,6 раза при  $\mathbf{W}_{var} = 10$  м/с.

Из анализа данных, приведенных в нижней части табл. 1, видно, что наибольшие сгоны формируются для всех рассматриваемых значений скоростей ветра на станции Геническ. Сгоны, вызываемые постоянным ветром со скоростью 5, 10 и 15 м/с, составляют 12,2; 51,7 и 130,3 см соответственно, т. е. возрастают в 4,2 и 10,6 раз. Совместное действие системы ветров приводит к возрастанию максимальных сгонов для  $\mathbf{W}_{var} = 5$  м/с в 2,8 раза и для  $\mathbf{W}_{var} = 10$  м/с в 4,1 раза.

**3.** В следующей серии численных экспериментов оценим влияние параметра ветра и положение источников загрязнения на распространение пассивной примеси, поступающей в море в различных районах. Загрязняющие вещества распространяются под действием

Таблица 1. Максимальные нагоны и сгоны (см) на береговых станциях Азовского моря для различной скорости стационарного и переменного ветра

Береговые станции	$\mathbf{W}_{st}^1$			$\mathbf{W}_{st}^2$			$\mathbf{W}_{st}^3$		
	СТ	$\mathbf{W}_{var}$		СТ	$\mathbf{W}_{var}$		СТ	$\mathbf{W}_{var}$	
		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	55,2	74,0	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
Темрюк	6,1	27,2	73,6	26,9	53,0	119,1	68,0	91,3	177,0
Мысовое	0,9	7,6	17,4	3,9	3,9	11,7	10,6	21,5	38,7
Геническ	12,2	35,3	49,4	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	8,2	11,3	3,1	12,1	24,6
Таганрог	1,2	14,6	18,5	5,4	10,3	16,7	17,0	32,8	47,5
Ейск	0,0	10,4	12,3	0,1	15,8	22,8	0,3	20,4	31,5
Темрюк	1,9	27,0	65,0	4,4	37,7	75,6	0,5	40,1	72,5
Мысовое	6,3	27,2	70,5	25,9	63,9	131,9	61,5	116,8	203,4

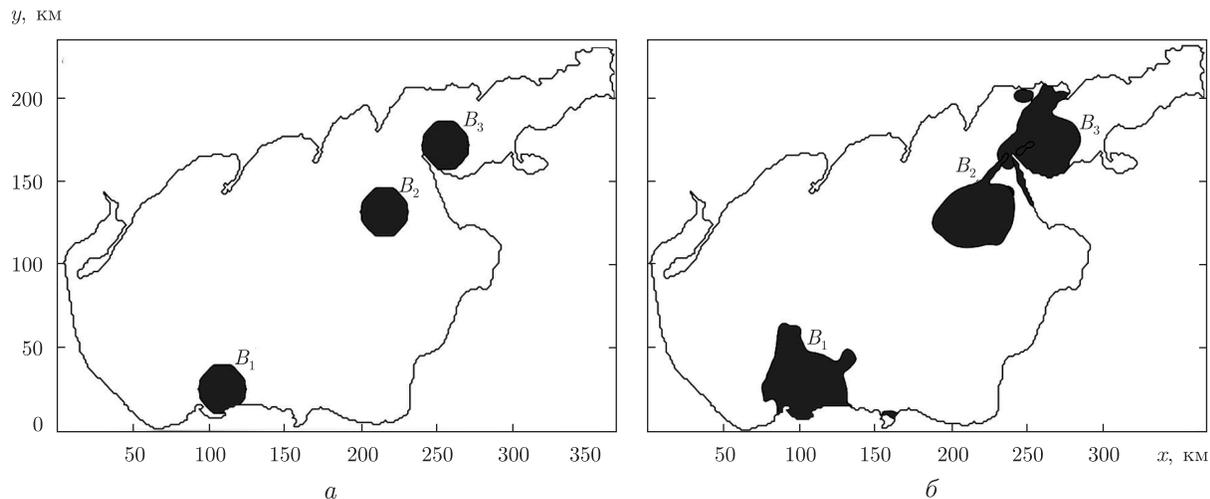


Рис. 1. Трансформация областей загрязнения в момент времени  $t = t_0$  (а) и  $t = t_{\max}$  (б)

турбулентной диффузии и переносятся течениями, генерируемыми постоянным и переменным ветром. Выброс загрязнений происходит на свободной поверхности в момент времени  $t = t_0$  в виде пятен радиусом 9 км. Центры выбросов загрязнений показаны на рис. 1:  $B_1$  — в районе Восточно-Казантипского газового месторождения;  $B_2$  — над самой глубоководной частью моря;  $B_3$  — в Таганрогском заливе. Для расчета трансформации областей загрязнений выбраны следующие значения коэффициентов:  $A_H = 10 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $K_H = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  [7]. Для количественной оценки изменения площади загрязнения с течением времени на горизонтах  $z = 0$ ,  $z = -H/2$  и  $z = -H$  используем коэффициент  $K_{\max}$ , который рассчитываем как отношение максимальной площади  $S_{\max}$ , ограниченной изолинией концентрации примеси  $C_d$  в момент времени  $t_{\max}$ , к площади первоначального загрязнения  $S_0$  при  $t = t_0$ .

Коэффициент максимального охвата области загрязнения, время его достижения ( $t_{\max}$ , ч) и полного рассеяния примеси ( $t_d$ , ч) на разных глубинах моря для различных скоростей стационарных течений при наличии нестационарного ветра иллюстрирует табл. 2. Оценим влияние скорости стационарных течений и переменного ветра на трансформацию загрязнения в районе  $B_1$ , где осваиваются газовые месторождения. Глубина моря в этом

Таблица 2. Параметры эволюции примеси на различных глубинах Азовского моря при совместном воздействии стационарного и нестационарного ветра

Горизонт	Параметры загрязнения	$\mathbf{W}_{st}^1$			$\mathbf{W}_{st}^2$			$\mathbf{W}_{st}^3$		
		Центры выбросов								
		$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_1$	$B_2$	$B_3$
$z = 0$	$K_{\max}$	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
$z = -H/2$	$K_{\max}$	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	100	84	66	100	84	66
$z = -H$	$K_{\max}$	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

районе 10 м. В пункте поступления примеси стационарные течения направлены в сторону действующего ветра, куда происходит перенос примеси (см. рис. 1). Спустя 12 ч, после прекращения действия нестационарного ветра, наблюдается сокращение площадей загрязнения и уменьшение концентрации примеси. Из анализа данных, приведенных в табл. 2, следует, что для района  $B_1$  максимальная площадь загрязнения имеет место при максимальном значении скорости стационарного ветра. Так, на свободной поверхности  $K_{\max} = 1,25$  достигается через 11 ч после выброса примеси. При этом время ее полного рассеяния здесь составляет 87 ч. На глубину  $z = -H/2$  загрязнение проникает спустя 2 ч после его выброса на поверхность. Далее площадь загрязнения увеличивается и при  $t_1 = 34$  ч становится максимальной ( $K_{\max} = 1,27$ ). Полное рассеяние загрязнения на этой глубине происходит при  $t_1 = 104$  ч. В придонном слое наибольший коэффициент (1,33) охвата области загрязнения отмечен при  $t_1 = 35$  ч и, спустя 110 ч от момента выброса, максимум концентрации примеси становится равным  $C_d$ .

В районе аварийного выброса  $B_2$  под действием нестационарного ветра перенос области загрязнения также обусловлен направлением генерируемых им течений (см. рис. 1). После прекращения действия переменного ветра пятно смещается в западном направлении, противоположном направлению ветра. По данным табл. 1, при  $\mathbf{W}_{st}^3$  максимум площади загрязнения на поверхности составляет 1,22 ( $t_{\max} = 11$  ч), на глубине  $z = -H/2 - 1,25$  ( $t_{\max} = 29$  ч), в придонном слое — 1,33 ( $t_{\max} = 33$  ч). Рассеяние примеси происходит через 92 ч после ее появления. Глубина моря в районе выброса загрязнения, центром которого является пункт  $B_3$ , наименьшая из рассматриваемых и равна 8 м. В Таганрогском заливе скорости установившихся течений наибольшие и в слое 0–1 м достигают 86 см/с. Из рис. 1 видно, что через 15 ч, после начала действия нестационарного ветра на свободной поверхности, области с концентрацией 0,025 и более увеличиваются и становятся вытянутыми вдоль направления ветра. Область загрязнения при этом перемещается на восток. Согласно данным, приведенным в табл. 1, значения  $K_{\max}$  для этого пункта наименьшие по сравнению с остальными и составляют: на поверхности 1,16 ( $t_{\max} = 14$  ч), на глубине  $z = -H/2 - 1,22$  ( $t_{\max} = 15$  ч), в придонном слое 1,25 ( $t_{\max} = 16$  ч). Полное рассеяние происходит через 79 ч с момента выброса.

1. 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.
2. 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 // *Доп. НАН України*. – 2007. – № 3. – С. 112–117.
3. Фомин В. В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря // *Науч. тр. – Киев: Укр. науч.-исслед. гидромет. ин-т.*, 2002. – Вып. 249. – С. 246–255.
4. Blumberg A. F., Mellor G. L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coast Ocean Models // *Coast. and Estuar. Sci.* – 1987. – No 4. – P. 1–16.
5. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР*. Т. 3. Азовское море. – Ленинград: Гидрометеоиздат, 1986. – 218 с.
6. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. Т. 5. Справочное издание. Проект “Моря СССР”. – Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 1991. – 234 с.
7. Якушев Е. В., Сухинов А. И., Лукашев Ю. Ф. и др. Комплексные океанологические исследования Азовского моря в 28-м рейсе научно-исследовательского судна “Акванавт” (июль–август 2001 г.) // *Океанология*. – 2003. – 43, № 1. – С. 44–53.

Academician of the NAS of Ukraine **V. A. Ivanov, V. V. Fomin,**  
Corresponding Member of the NAS of Ukraine **L. V. Cherkesov, T. Ya. Shul'ga**

**Simulation of surge phenomena and impurity evolution induced by  
a variable wind in the Sea of Azov**

*Surge phenomena and flows in the Sea of Azov induced by a variable wind in the presence of stationary currents are studied using the three-dimensional nonlinear mathematical model. Features of the impurity transformation in the water area at the joint action of stationary and unstationary winds are investigated. The results of numerical calculations allow us to make conclusions on the dependence of the contamination dispersion time on the wind speed and the location of contamination centers. It is shown that a variable wind results in the substantial increase of level inclinations and the contamination evolution area as compared to the influence of stationary currents only.*