

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

## **Волны, течения и эволюция пассивной примеси, вызываемые прогностическим ветром в Азовском море**

*В настоящей работе с использованием нелинейной трехмерной сигма-координатной модели с учетом стационарных течений исследуются динамические процессы, возникающие под действием постоянного и прогностического ветра в Азовском море. Найдены зависимости величин сгонов, нагонов и характеристик эволюции областей загрязнения от интенсивности атмосферных возмущений.*

Изменения уровня Азовского моря, являющиеся следствием сгонно-нагонных явлений и сопровождающиеся при сгонах обмелением, а при нагонах затоплением, приводят в отдельных случаях к катастрофическим последствиям. Сложность, высокая стоимость и невозможность в реальных условиях моря учета всех действующих факторов (ветер, течения, волны) существенно усложняют получение надежных данных об эволюции загрязняющих веществ. Обоснованное представление о возникающих в море динамических процессах позволяет выполнить анализ результатов численных экспериментов с использованием современных методов математического моделирования.

В данном сообщении применена трехмерная нелинейная  $\sigma$ -координатная модель [1, 2], позволившая получить численное решение нелинейных уравнений движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в квазигидростатическом приближении [3]. С учетом стационарных течений установлены зависимости величин сгонов, нагонов, скоростей течений и характеристик эволюции областей загрязнения от интенсивности постоянного и прогностического ветра SKIRON [4]. В предыдущих работах [5, 6] исследованы течения и колебания уровня, возникающие под действием только постоянного ветра при отсутствии стационарных течений.

1. Гидродинамический блок разработан на основе уравнений гидродинамики, дополнительных блоком переноса консервативной примеси. Численная реализация системы дифференциальных уравнений представила возможность изучить волновые поля, трехмерную структуру и процесс распространения примеси по акватории моря.

В начальный момент времени ( $t = 0$ ) движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна и над Азовским морем начинает действовать постоянный западный ветер ( $\mathbf{W}_{st} = 5$  м/с), генерирующий с течением времени стационарные течения. Условие выхода на стационарный режим определяется тем, что между двумя соседними значениями времени не происходит заметных изменений отклонений уровня и скоростей течений (не более пяти процентов). Исходя из этого, находим время установления движения жидкости ( $t = t_0$ ).

К действию постоянного ветра при  $t \geq t_0$  добавляются поля прогностического ветра [4]. Для установления физических закономерностей влияния интенсивности неоднородных атмосферных воздействий рассмотрены поля приводного ветра, интенсивность которых увеличена и уменьшена в два раза ( $\gamma \mathbf{W}_{Skiron}$ ;  $\gamma = 1/2$ ;  $\gamma = 1$ ;  $\gamma = 2$ ). Полученные в случае

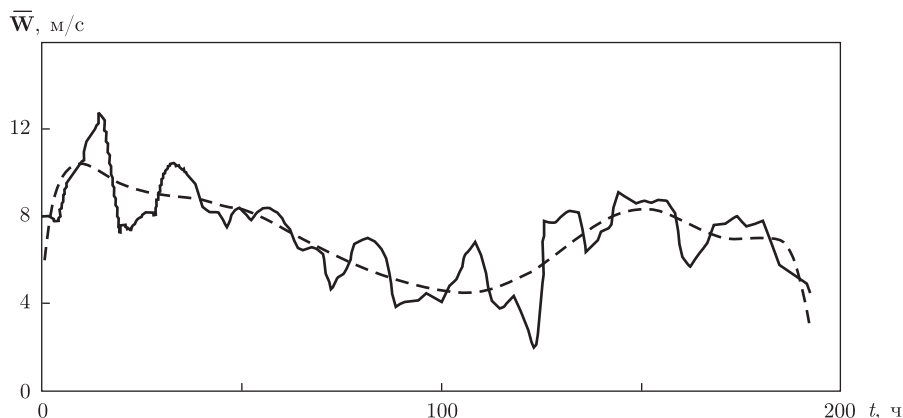


Рис. 1. Средняя скорость ветра над Азовским морем с 8 по 15 сентября 2007 г. (сплошная линия) и ее тренд (штриховая)

только  $\mathbf{W}_{\text{Skiron}}$  величины амплитуд волн сравниваются с данными натурных наблюдений на гидрологических станциях.

В поверхностном слое глубиной, равной шагу интегрирования по вертикали, происходит при  $t = t_0$  выброс примеси в цилиндрической области радиусом 9 км. В качестве параметров, характеризующих эволюцию загрязнения, выбраны: время рассеивания примеси ( $t_d$ ); коэффициент максимальной площади ее распространения на различных горизонтах ( $K_{\text{max}}$ ). При этом  $K_{\text{max}} = S_{\text{max}}/S_0$ , где  $S_0$  — площадь области начального распространения примеси;  $S_{\text{max}}$  — наибольшая площадь загрязнения, достигаемая на соответствующих горизонтах при  $t = t_{\text{max}} < t_d$ . Условием полного рассеивания примеси, начальная концентрация которой равна единице, принимается значение концентрации, не превышающее  $2,5 \cdot 10^{-2}$  во всей акватории моря ( $C_d = 2,5 \cdot 10^{-2}$ ).

Для численной реализации в исходных уравнениях, граничных и начальных условиях выполняется переход от координаты  $z$  к координате  $\sigma$  [1, 2]. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости для баротропных волн [7]. Топография дна расчетной области на модельную сетку интерполирована из массива глубин, снятого с навигационных карт. Отклонения уровня Азовского моря анализируются на девяти станциях, расположенных вблизи крупных населенных пунктов.

**2.** Выполним анализ изменения со временем полей прогностического ветра SKIRON с 8 по 18 сентября 2007 г. на всей поверхности Азовского моря. На рис. 1 даны графики осредненной по всей поверхности моря скорости ветра (сплошная линия) и ее тренд в течение 192 ч (8 сут). Эта скорость в каждый момент времени рассчитывалась по формуле  $\bar{\mathbf{W}} = \sum_{k=1}^n |\mathbf{W}_{\text{Skiron}}^k|$ , где  $n$  — число узлов расчетной сетки,  $|\mathbf{W}_{\text{Skiron}}^k|$  — модуль скорости ветра в  $k$ -м узле. Аппроксимация полиномом 9-й степени проводится по методу наименьших квадратов [8] и дает тренд поведения скорости (штриховая линия). Отсюда видно, что в течение первых 2 сут происходило усиление ветра до 9 м/с, в период следующих 3 сут скорость монотонно уменьшалась до 5 м/с. Затем в период еще 3 сут отмечалось ее резкое снижение до 2 м/с, после чего она уже не превышала 3 м/с (над морем штиль). В среднем (по времени) скорость приводного ветра составляла 5,5 м/с. Отметим, что данные многолетних наблюдений атмосферных возмущений за сентябрь месяц в районе Азовского моря [9] удов-

летворительно согласуются с результатами численных расчетов (см. рис. 1) атмосферных полей модели SKIRON.

В табл. 1 приведены максимальные значения скоростей стационарных течений, вызванных постоянным ветром ( $\mathbf{W}_{st}$ ), максимальные величины скоростей течений, генерируемых приводным ветром ( $\gamma\mathbf{W}_{Skiron}$ ) и их совместным действием ( $\mathbf{W}_{st} + \gamma\mathbf{W}_{Skiron}$ ). Здесь даны горизонты, а также координаты наибольших значений скорости и время их достижения. Анализ приведенных данных свидетельствует о том, что при наличии стационарных течений максимумы скоростей нестационарных течений ( $U_{max}$ ) увеличиваются по сравнению со скоростями течений, вызванных действием только прогностического ветра. Из сравнения  $U_{max}$  на различных горизонтах следует, что значения  $U_{max}$  для ( $\mathbf{W}_{st} + \mathbf{W}_{Skiron}$ ) возрастают на 43% (горизонт 1 м), 46% (5 м) и 44% (10 м) по сравнению со случаем при  $\mathbf{W}_{Skiron}$ . Отсюда следует, что при наличии стационарных течений максимумы скоростей нестационарных течений увеличиваются по сравнению с их значениями при действии только прогностического ветра.

Так, на рассматриваемых горизонтах под действием системы ветров  $\mathbf{W}_{st} + \gamma\mathbf{W}_{Skiron}$  величины  $U_{max}$  становятся больше в 1,7, 1,8 и 2,2 раза, чем только при  $\gamma\mathbf{W}_{Skiron}$  ( $\gamma = 1/2$ ;  $\gamma = 1$ ;  $\gamma = 2$  соответственно). При этом для всех скоростей ветра  $U_{max}$  убывают с ростом горизонта. Скорости течений, рассчитанные без учета стационарных течений для полей прогностического ветра интенсивности  $\mathbf{W}_{Skiron}/2$  и  $2\mathbf{W}_{Skiron}$ , отличаются не более чем на 25% по сравнению со скоростями, вызванными действием  $\mathbf{W}_{Skiron}$ .

Анализ направлений скоростей поверхностных течений, полученных в результате моделирования, приводит к выводу о том, что в начальный период ( $0 < t < 12$  ч) действия постоянного западного ветра направления течений на всей акватории моря мало отличаются

Таблица 1. Максимальные значения скоростей течений на различных горизонтах Азовского моря, время их достижения и соответствующие им координаты

Скорость ветра	Горизонт, м	$U_{max}$ , М/с	$x_{max}$ , КМ	$y_{max}$ , КМ	$t_{max}$ , Ч
$\mathbf{W}_{st} = 5$ м/с	1	0,16	236,90	174,08	8,0
	5	0,12	237,01	173,31	8,2
	10	0,08	235,34	173,05	9,4
$\frac{1}{2}\mathbf{W}_{Skiron}$	1	0,35	198,78	188,36	131,8
	5	0,25	259,84	194,38	135,3
	10	0,24	228,97	174,97	140,0
$\mathbf{W}_{Skiron}$	1	0,48	206,25	189,27	128,0
	5	0,43	263,30	199,05	137,3
	10	0,31	238,20	175,76	145,1
$2\mathbf{W}_{Skiron}$	1	0,58	206,69	190,59	132,6
	5	0,52	263,53	193,96	136,4
	10	0,41	238,66	174,55	142,6
$\mathbf{W}_{st} + \frac{1}{2}\mathbf{W}_{Skiron}$	1	0,61	201,47	109,47	128,3
	5	0,54	225,04	161,18	137,8
	10	0,35	174,6	166,87	145,2
$\mathbf{W}_{st} + \mathbf{W}_{Skiron}$	1	0,73	224,98	188,34	128,2
	5	0,61	257,95	191,86	137,5
	10	0,45	235,34	174,61	145,1
$\mathbf{W}_{st} + 2\mathbf{W}_{Skiron}$	1	1,57	208,72	111,75	132,6
	5	1,24	229,67	161,92	137,0
	10	1,02	175,72	168,25	142,2

ся от направления ветра (не более чем на 1–2 град). Начиная с момента установления движения жидкости, в северной части моря происходит уменьшение скоростей течений и изменение их направлений на противоположное, в центральной части моря наблюдается циркуляция вод против часовой стрелки. С началом действия переменного по времени и пространству ветра  $\mathbf{W}_{\text{Skiron}}$  характер движения вод нарушается и у северного побережья возникают два вихря одинакового знака. В дальнейшем (при  $t \geq 60$  ч), циркуляция характеризуется наличием трех круговоротов: антициклонического (в северной части моря) и двух циклонических (у южного берега). Вдоль границ, разделяющих основные круговороты, формируются полосы, в которых скорости течений направлены против ветра.

В табл. 2 на береговых станциях Азовского моря даны значения максимальных отклонений уровня, вызванных действием стационарного ветра ( $\mathbf{W}_{\text{st}}$ ), только приводного ветра различной интенсивности ( $\gamma \mathbf{W}_{\text{Skiron}}$ ) и их суперпозицией ( $\mathbf{W}_{\text{st}} + \gamma \mathbf{W}_{\text{Skiron}}$ ). В верхней части таблицы приведены величины нагонов, в нижней — сгонов. Из анализа представленных здесь результатов расчетов следует, что наибольшие нагоны возникают при совместном действии стационарного и удвоенного прогностического ветра ( $\mathbf{W}_{\text{st}} + 2\mathbf{W}_{\text{Skiron}}$ ) и имеют место на станциях Приморско-Ахтарск (129,2 см), Таганрог (128,2 см) и Ейск (93,7 см). Отсюда видно, что максимум нагона в случае действия рассмотренной системы ветров в 6,24 раза больше, чем в стационарном режиме (129,2 и 20,7 см соответственно).

При совместном действии переменного и постоянного ветра максимальные сгоны становятся больше, чем в установившемся режиме. Для всех рассматриваемых видов ветра максимальные сгоны имеют место в Геническе: 12,2 см ( $\mathbf{W}_{\text{st}}$ ); 35,5 см ( $\mathbf{W}_{\text{st}} + (1/2)\mathbf{W}_{\text{Skiron}}$ ); 76,5 см ( $\mathbf{W}_{\text{st}} + \mathbf{W}_{\text{Skiron}}$ ); 92,5 см ( $\mathbf{W}_{\text{st}} + 2\mathbf{W}_{\text{Skiron}}$ ).

Таблица 2. Максимальные нагоны и сгоны ( $|\zeta|_{\text{max}}$ , см) на береговых станциях Азовского моря в стационарном режиме и вызванные приводным ветром при отсутствии и наличии стационарных течений

Береговые станции	$\mathbf{W}_{\text{st}}$	$\gamma \mathbf{W}_{\text{Skiron}}$			$\mathbf{W}_{\text{st}} + \gamma \mathbf{W}_{\text{Skiron}}$		
		$\gamma = \frac{1}{2}$	$\gamma = 1$	$\gamma = 2$	$\gamma = \frac{1}{2}$	$\gamma = 1$	$\gamma = 2$
	$ \zeta _{\text{max}}$	$ \zeta _{\text{max}}$	$ \zeta _{\text{max}}$	$ \zeta _{\text{max}}$	$ \zeta _{\text{max}}$	$ \zeta _{\text{max}}$	$ \zeta _{\text{max}}$
Геническ	—	20,0	25,4	31,4	29,4	32,2	51,5
Бердянск	—	4,9	9,6	10,9	7,0	16,9	16,9
Мариуполь	9,8	18,5	29,3	39,9	28,0	46,4	65,4
Таганрог	20,7	40,6	50,6	79,6	57,1	63,1	128,2
Ейск	13,8	19,1	38,1	59,9	30,0	76,0	93,7
Приморско-Ахтарск	8,1	40,6	57,1	89,3	61,7	80,4	129,2
Темрюк	10,2	20,2	24,5	28,6	28,4	29,7	43,3
Опасное	—	5,5	9,4	14,5	7,9	16,1	23,6
Мысовое	7,5	7,5	12,1	17,0	12,1	19,6	25,0
Геническ	12,2	22,3	42,5	62,2	35,5	76,5	92,5
Бердянск	4,0	9,7	17,3	27,1	15,1	30,9	38,0
Мариуполь	—	12,7	18,2	27,2	18,7	26,0	43,7
Таганрог	—	21,2	29,0	37,2	35,0	42,4	60,8
Ейск	—	8,7	18,9	21,5	12,3	41,1	34,5
Приморско-Ахтарск	—	8,4	14,1	16,1	12,2	23,8	26,2
Темрюк	—	6,8	8,7	13,3	10,2	11,2	18,9
Опасное	3,3	5,5	10,6	15,2	8,5	20,5	22,7
Мысовое	—	12,6	22,3	30,0	20,0	39,4	42,8

3. Целью следующей серии численных экспериментов является оценка влияния рассматриваемых полей ветра и возникающих при этом течений на распространение пассивной примеси, поступающей в центральный район Азовского моря. Время выброса загрязнения ( $t = t_0$ ) в экспериментах различно и зависит от полей действующего ветра. При исследовании времени процессов распространения и рассеивания примеси для удобства анализа принимаем, что во всех рассматриваемых случаях время выброса ( $t_0$ ) равно нулю.

Анализ результатов численных расчетов свидетельствует о том, что площади распространения областей загрязнения в поверхностном и глубинных слоях Азовского моря зависят от скорости ветра, действующего над акваторией. С увеличением интенсивности ветра становятся больше скорости течений (см. табл. 1) и, как следствие этого, возрастают площади распространения примеси и время ее полного рассеивания. Максимальная площадь загрязнения имеет место для максимального значения скорости действующего ветра ( $W_{st} + 2W_{Skiron}$ ). В этом случае на свободной поверхности через 40 ч после выброса примеси достигается наибольшая величина отношения площади области загрязнения к ее начальному ( $t = 0$ ) значению ( $K_{max} = 1,32$ ), а время полного рассеяния составляет 87 ч. Максимальное значение отношения этих площадей (1,35) на глубине 5 м имеет место, спустя 42 ч после выброса примеси, а полное рассеяние загрязнения происходит через 110 ч. В придонном слое на глубине 12 м максимальная величина отношения этих площадей (1,38) достигается через 59 ч после выброса примеси, а через 115 ч ее концентрация во всей акватории моря не превышает 2,5% от начального значения.

Таким образом, нами представлены результаты исследования сгонно-нагонных явлений и распространения пассивной примеси системой течений, вызванных действием постоянного и переменного ветра в Азовском море. Достоверность установленных выводов подтверждается сравнением рассчитанных значений экстремальных сгонов и нагонов с данными натуральных наблюдений, полученными во время действия ветра SKIRON на береговых гидрометеорологических станциях.

1. Blumberg A. F., Mellor G. L. A description of three-dimensional coastal ocean circulation model // Three-Dimensional Coast Ocean Models, Coastal Estuarine Sci. – Washington, DC: AGU, 1987. – P. 1–16.
2. Фомин В. В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Науч. тр. УкрНИГМИ. – 2002. – Вып. 249. – С. 246–255.
3. Черкесов Л. В., Иванов В. А., Хартиев С. М. Введение в гидродинамику и теорию волн. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. – 264 с.
4. Weather and wave forecast for Greece, Europe – Mediterranean sea. – <http://forecast.uoa.gr>.
5. 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.
6. Фомин В. В., Шульга Т. Я. Исследование волн и течений, возникающих под действием ветра в Азовском море // Там же. – 2006. – № 12. – С. 110–115.
7. Courant R., Friedrichs K. O., Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics // IBM J. – 1967. – No 3. – P. 215–234.
8. Демидович Б. П., Марон И. А. Численные методы анализа. – Москва: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. – 400 с.
9. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. III, Азовское море. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. – 218 с.

Академік НАН України **В. О. Іванов**,  
член-кореспондент НАН України **Л. В. Черкесов, Т. Я. Шульга**

**Хвилі, течії та еволюція пасивної домішки, що викликаються  
прогностичним вітром в Азовському морі**

*У даній роботі з використанням нелінійної тривимірної сигма-координатної моделі з урахуванням стаціонарних течій досліджуються динамічні процеси, що виникають під дією постійного і прогностичного вітру в Азовському морі. Знайдено залежності величин згонів, нагонів і характеристик еволюції областей забруднення від інтенсивності атмосферних збурень.*

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

**Waves, currents, and evolution of a passive admixture caused by  
a forecasts wind in the Sea of Azov**

*With the use of a nonlinear three-dimensional sigma-coordinate model, the dynamical processes caused by the action of a forecasts wind in the Sea of Azov in the presence of stationary currents are investigated. The dependences of surge phenomena, speeds of currents, and characteristics of the evolution of areas of pollution on various horizons on the intensity of atmospheric perturbations are found.*