

В.А. Иванов, Л.В. Черкесов, Т.Я. Шульга

Исследование влияния стационарных течений на динамические процессы и эволюцию примеси в Азовском море, вызванные действием ветра

С использованием трехмерной нелинейной математической модели изучаются динамические процессы и особенности трансформации примеси в Азовском море, вызванные действием переменного ветра и атмосферного давления при наличии стационарных течений. На основании результатов численных расчетов сделаны выводы о влиянии величин скоростей стационарных течений на максимальные отклонения уровня и скорости нестационарных течений, генерируемых полями ветра, полученными по атмосферной модели SKIRON. Выполнен анализ влияния изменения интенсивности стационарных течений на размеры областей осушения и затопления в прибрежных районах моря в зависимости от угла наклона (подъема) рельефа береговой зоны. Показано, что совместное действие постоянного ветра и ветра прогностической модели SKIRON приводит к существенному увеличению площади распространения пассивной примеси и времени ее рассеивания по сравнению с воздействием только стационарных течений.

Ключевые слова: численное моделирование, σ -координатная модель, динамические процессы, стационарные течения, области осушения и затопления, эволюция пассивной примеси.

Введение

Последствия интенсивной промышленной и сельскохозяйственной деятельности в Азово-Черноморском регионе оказывают заметное негативное влияние на морскую среду. В связи с этим возникает необходимость проведения научных исследований с целью оценить последствия этого влияния и найти пути его существенного уменьшения. Одним из направлений таких исследований является анализ сгонно-нагонных процессов и определение районов возможных затоплений и осушений в прибрежных областях Азовского моря.

Изучение течений и колебаний уровня, возникающих в Азовском море под действием переменного во времени ветра и атмосферного давления при отсутствии стационарных течений, проведено в [1, 2]. В настоящей работе с использованием математического моделирования [3 – 5] исследуется влияние стационарных течений на сгонно-нагонные явления, вызываемые действием ветра, приповерхностные поля которого рассчитываются методом реанализа SKIRON [6]. Выполнено сравнение результатов проведенных численных расчетов с данными натурных наблюдений, полученными во время действия этого ветра, на ряде гидрологических станций. Найдены зависимости характеристик эволюции областей загрязнения на различных горизонтах от параметров прогностического ветра и величин скоростей стационарных течений.

Постановка задачи. Граничные и начальные условия

Поставим своей задачей исследовать движение жидкости, вызываемое атмосферными возмущениями, действующими на поверхность Азовского моря. При этом в качестве исходной примем систему нелинейных уравнений движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [3, 7, 8]. Введем систему координат, в которой ось x направлена на восток, y – на север, z – вертикально вверх. На свободной поверхности удовлетворяются кинематическое и динамические условия. На дне ($z = -H(x, y)$) нормальная составляющая скорости равна нулю, придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [3, 4]. На твердых боковых границах выполняются условия прилипания. В начальный момент времени ($t = 0$) движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна.

Начиная с момента времени $t = 0$ на невозмущенную поверхность действует постоянный западный ветер (\mathbf{W}_{st}). С момента установления течений к действию этого ветра присоединяется действие прогностического ветра (\mathbf{W}_{SKIRON}). Условие выхода на стационарный режим определяется тем, что между двумя соседними значениями времени не происходит заметных изменений отклонения уровня и скоростей течений (не более 5%). Исходя из этого, находим время установления движения жидкости ($t = t_1$).

Для расчета распространения примеси концентрацией $C(x, y, z, t)$ используем уравнение переноса и диффузии [3, 5]. К динамическим граничным условиям на свободной поверхности и в придонном слое добавляются условия отсутствия потоков примеси через свободную поверхность, боковые стенки и дно бассейна. В качестве параметров, характеризующих эволюцию загрязнения, выбраны время рассеивания примеси (t_d) и коэффициент максимальной площади ее распространения на различных горизонтах (K_{max}). Будем считать, что полное рассеивание примеси происходит при значении концентрации C_d , не превышающем $2,5 \cdot 10^{-2}$ по всей акватории моря.

В рассматриваемом случае в исходных уравнениях движения, переноса и диффузии, граничных и начальных условиях выполняется переход от координаты z к σ -координате [3 – 5]. При этом алгоритм решения базируется на применении двухслойных разностных схем. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости для баротропных волн [9]. Топография дна расчетной области интерполирована на модельную сетку из массива глубин, взятого из навигационных карт. Отклонения уровня Азовского моря анализируются по данным девяти станций, расположенных вблизи крупных населенных пунктов.

Анализ численных экспериментов

В серии численных экспериментов исследуется влияние совместного действия стационарного и прогностического ветров ($\mathbf{W}_{st} + \mathbf{W}_{SKIRON}$) на максимальные скорости течений и экстремальные значения сгонов и нагонов. Полученные результаты сравниваются с данными расчетов, выполненных

при моделировании волновых процессов в Азовском море, которые вызваны постоянным или только прогностическим ветром.

Моделирование двух начальных полей установившихся течений выполняется для постоянного западного ветра со скоростью $W_{st}^1 = 5$ м/с, $W_{st}^2 = 10$ м/с. В качестве переменного по времени и неоднородного по пространству ветра используются поля приводного ветра модели SKIRON [6] за период 8 – 18 сентября 2007 г. Действие этого (прогностического) ветра при наличии стационарных течений в Азовском море происходит в течение 10 сут. Результаты первых трех суток не анализируются и применяются для получения начальных данных о скоростях течений и уровне моря на 0 ч 11 сентября 2007 г.

1. Анализ информации о характерных типах погоды для района Азовского моря свидетельствует о том, что в теплый период года (апрель – октябрь) имеет место антициклонический тип. Он характеризуется ветрами со скоростью не более 8 м/с, когда Азовское море оказывается в тыловой части антициклона, смещающегося с запада на восток. В это время преобладают восточные и северо-восточные ветры.

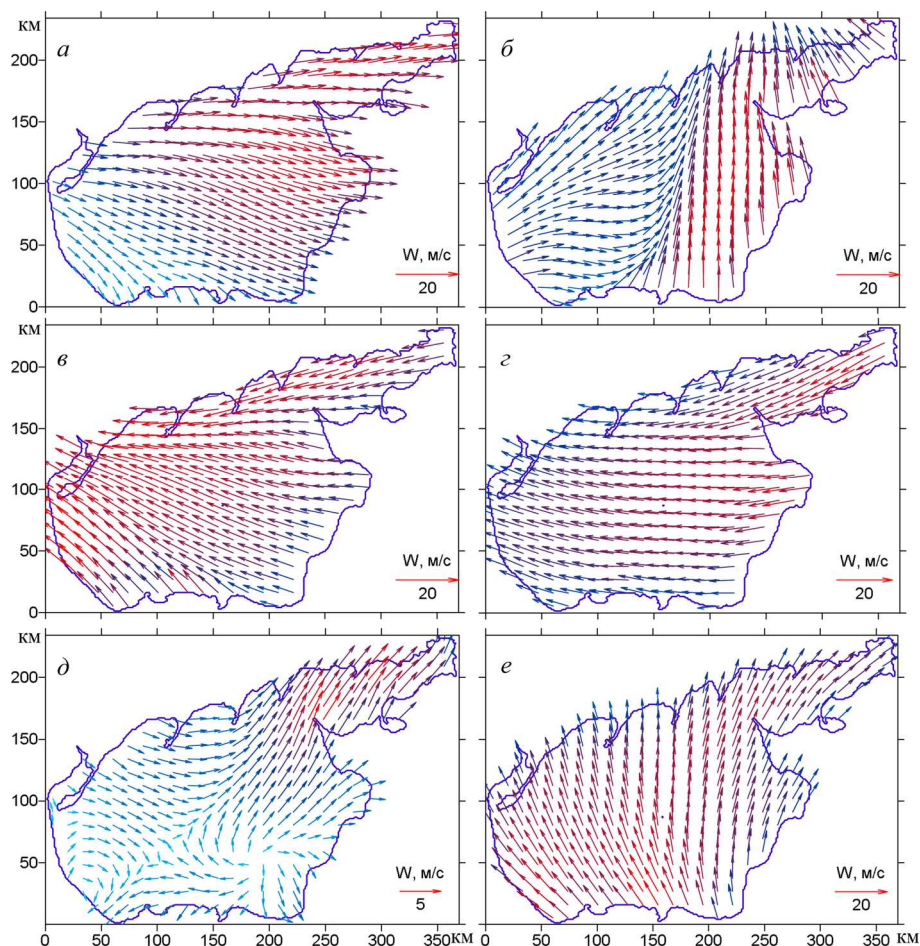
В табл. 1 приведены максимальные скорости при различном направлении ветра W_{SKIRON} как функции времени (над Азовским морем). При этом между двумя соседними значениями времени скорость ветра меняется монотонно. Величина отклонения вектора скорости ветра от направления оси x (на восток под углом 50° к параллели) указана в градусах. Отсюда видно, что за рассматриваемый период (192 ч) наибольшее, среднее и наименьшее значения максимальной скорости равны 12,7; 6,7 и 1,6 м/с соответственно. Преобладающими направлениями ветра являются северо-восточное и северо-западное. Отметим, что результаты многолетних наблюдений атмосферных возмущений [10] удовлетворительно согласуются с данными модели SKIRON, приведенными в этой таблице.

Т а б л и ц а 1

Максимальные скорости ветра как функции времени, полученные по данным модели SKIRON с 0 ч 11 сентября до 24 ч 18 сентября 2007 г.

Время, ч	Скорость ветра, м/с	Направление ветра, град	Время, ч	Скорость ветра, м/с	Направление ветра, град
2	6,8	107	76	9,4	354
14	2,6	344	92	12,7	350
28	5,8	9	104	9,6	100
30	3,0	10	106	7,5	210
32	5,2	107	108	5,7	200
44	5,8	344	112	3,5	110
48	8,1	100	124	5,2	344
50	4,2	213	130	3,3	354
54	5,8	195	132	1,6	347
56	7,9	192	140	2,1	10
58	9,6	108	142	4,9	106
62	11,6	350	192	5,8	200

На рис. 1 показаны векторные поля прогностического ветра над Азовским морем, которые соответствуют экстремальным значениям его скорости или резким переменам направления. Первая экстремальная ситуация возникает через 36 ч (рис. 1, *a*). При этом над южной частью отмечается антициклоническое воздействие, а в северной части моря скорость ветра на отдельных участках достигает 10 м/с. Через 68 ч со скоростью 15 – 20 м/с перемещаются два небольших циклона (рис. 1, *б*), которые формируются в восточной и западной частях моря.



Р и с. 1. Поля прогностического ветра в различные моменты времени от 0 ч 11 сентября 2007 г.: 36 ч (*a*); 68 ч (*б*); 90 ч (*в*); 140 ч (*з*); 152 ч (*д*); 168 ч (*e*)

Следующие максимумы скоростей ветра приходятся на 90 и 140 ч, они соответствуют обширным циклоническим образованиям (рис. 1, *в*, *з*). На рис. 1, *д*, *e* показаны поля ветра с экстремумами скорости в моменты времени 152 и 168 ч. В дальнейшем до 18 сентября над Азовским морем скорость ветра уменьшается и его направление практически не меняется.

Численные эксперименты реализованы для двух скоростей стационарного ветра западного направления с целью исследования влияния возникающих при этом стационарных течений на отклонения уровня моря и поля скоростей неустановившихся течений, вызванных в дальнейшем действием прогностического ветра. Выполнено сравнение результатов моделирования, полученных при различных скоростях постоянного ветра и при его отсутствии.

В табл. 2 приведены максимальные значения скоростей течений, вызванных постоянным ($W_{st}^{1,2}$) и только прогностическим (W_{SKIRON}) ветрами, а также их совместным действием ($W_{st}^{1,2} + W_{SKIRON}$). Из анализа этих данных следует, что при совместном действии ветров максимумы скоростей нестационарных течений увеличиваются.

Т а б л и ц а 2

Максимальные значения скоростей течений (U_{max}) на различных глубинах Азовского моря, время их достижения (t_{max}) и соответствующие им координаты

Скорость ветра, м/с	Глубина, м	U_{max} , м/с	x_{max} , км	y_{max} , км	t_{max} (ч. мин)
$W_{st}^1 = 5$	1	0,16	236,29	174,08	8.00
	3	0,13	236,39	173,44	8.02
	5	0,12	237,01	173,31	8.22
	10	0,08	235,34	173,00	9.44
$W_{st}^2 = 10$	1	0,49	235,38	172,19	8.35
	3	0,44	235,97	172,86	8.55
	5	0,41	237,07	171,50	8.26
	10	0,29	235,99	171,16	9.34
W_{SKIRON}	1	0,48	206,25	189,27	128
	3	0,46	241,76	188,88	130
	5	0,41	263,30	199,05	137
	10	0,35	238,20	175,76	145
$W_{st}^1 + W_{SKIRON}$	1	0,73	201,48	106,15	128
	3	0,69	224,73	176,44	130
	5	0,61	225,31	156,78	137
	10	0,45	174,86	160,92	145
$W_{st}^2 + W_{SKIRON}$	1	0,91	159,09	175,58	152
	3	0,85	199,38	159,67	154
	5	0,72	258,19	188,40	157
	10	0,65	209,66	146,44	162

Так, при $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$ величина U_{max} в 1,52; 1,50; 1,48 и 1,29 раза больше, чем при W_{SKIRON} на горизонтах 1; 3; 5 и 10 м соответственно. Аналогично при $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$ значение U_{max} в 1,9; 1,84; 1,75 и 1,58 раза больше, чем при W_{SKIRON} на тех же горизонтах. Легко видеть, что для всех значений скоростей ветра U_{max} монотонно убывает с увеличением горизонта. Отметим также, что

значения U_{\max} на рассматриваемых горизонтах при W_{st}^1 и W_{SKIRON} отличаются не более чем на 5%.

В табл. 3 приведены максимальные повышения (ζ_{\max}) и понижения ($|\zeta|_{\max}$) уровня при $W_{st}^{1,2}$, W_{SKIRON} и $W_{st}^{1,2} + W_{SKIRON}$. Видно, что при W_{st}^2 величины ζ_{\max} и $|\zeta|_{\max}$ в 3,45 и 3,9 раза больше, чем при W_{st}^1 . При W_{SKIRON} значения ζ_{\max} и $|\zeta|_{\max}$ в 2,15 и 2,5 раза больше, чем при W_{st}^1 , и в 1,6 и 1,5 раза меньше, чем при W_{st}^2 . При $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$ величина ζ_{\max} в 1,31, а $|\zeta|_{\max}$ в 2,1 раза больше, чем при $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$. Таким образом, действие стационарного ветра одного направления, но большей скорости приводит при наличии W_{SKIRON} к возрастанию наибольших отклонений уровня на 31 и 107% для ζ_{\max} и $|\zeta|_{\max}$ соответственно.

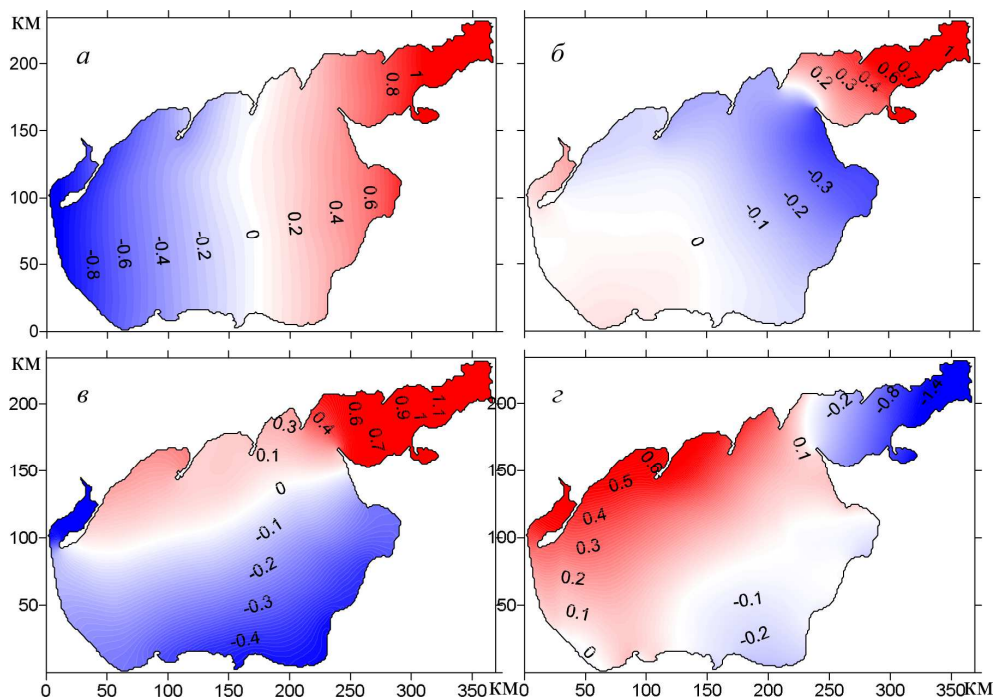
Т а б л и ц а 3

Максимальные значения повышения (ζ_{\max}) и понижения ($|\zeta|_{\max}$) уровня моря, время их достижения и соответствующие им координаты

Скорость ветра, м/с	ζ_{\max} , м	x_{\max} , км	y_{\max} , км	t_{\max} (ч.мин)	$ \zeta _{\max}$, м	x_{\min} , км	y_{\min} , км	t_{\min} (ч.мин)
$W_{st}^1 = 5$	0,20	366,51	219,61	17.10	0,10	4,02	95,07	13.23
$W_{st}^2 = 10$	0,69	367,86	218,27	18.46	0,39	4,02	107,13	13.47
W_{SKIRON}	0,43	278,50	90,10	168.15	0,25	20,10	122,50	190.55
$W_{st}^1 + W_{SKIRON}$	0,55	296,14	100,05	171.11	0,28	22,34	124,14	191.30
$W_{st}^2 + W_{SKIRON}$	0,72	290,20	101,10	172.20	0,58	21,25	124,00	192.45

Поля уровня моря, полученные в результате моделирования, показаны на рис. 2. Видно, что в установившемся режиме (рис. 2, а) отмечаются понижения уровня вдоль западного побережья (сгоны) и повышения – вдоль восточного (нагоны). Узловая (штриховая) линия пересекает центральную часть моря, она ориентирована перпендикулярно направлению ветра. С началом действия нестационарного ветра (рис. 2, б – в) области сгона и нагона перемещаются вдоль центральной части моря.

В табл. 4 для береговых станций Азовского моря приведены расчетные максимумы нагонов и сгонов, вызванных действием $W_{st}^{1,2}$, W_{SKIRON} и $W_{st}^{1,2} + W_{SKIRON}$. Здесь же указано время их достижения. В верхней части находятся величины нагонов, в нижней – сгонов. Из анализа представленных данных следует, что наибольшие нагоны, генерируемые стационарным ветром, имеют место на ст. Таганрог (20,7; 62,4 см), прогностическим ветром – на ст. Приморско-Ахтарск (57,1 см), при суперпозиции ветров – на ст. Приморско-Ахтарск (80,4 см) и Ейск (102,2 см) соответственно. Отсюда видно, что максимум нагона при $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$ в 1,27 раза больше, чем при $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$. Минимальные нагоны возникают в Мысовом (7,5 см при W_{st}^1 ; 13,9 см при W_{st}^2) и в Опасном (9,4 см при W_{SKIRON} ; 16,1 см при $W_{st}^1 + W_{SKIRON}$ и 34 см при $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$).



Р и с. 2. Поля уровня Азовского моря в различные моменты времени: стационарный режим, 48 ч (а); 68 ч (б); 90 ч (в); 140 ч (г)

Т а б л и ц а 4

Максимальные нагоны и сгоны (см) на береговых станциях Азовского моря при постоянном и прогностическом ветрах, а также при их совместном действии

Береговые станции	W_{st}^1	W_{st}^2	W_{SKIRON}	$W_{st}^1 + W_{SKIRON}$	$W_{st}^2 + W_{SKIRON}$
Геническ	–	–	25,4	32,2	62,3
Бердянск	–	–	9,6	16,9	44,3
Мариуполь	9,8	37,3	29,3	46,4	80,4
Таганрог	20,7	62,4	50,6	63,1	89,5
Ейск	13,8	52,2	38,1	76,0	102,2
П.-Ахтарск	8,1	43,2	57,1	80,4	91,1
Темрюк	10,2	26,9	24,5	29,7	49,9
Опасное	–	–	9,4	16,1	34,0
Мысовое	7,5	13,9	12,1	19,6	34,2
Геническ	12,2	51,7	42,5	76,5	87,0
Бердянск	4,0	17,6	17,3	30,9	62,1
Мариуполь	–	–	18,2	26,0	39,7
Таганрог	–	–	29,0	42,4	72,9
Ейск	–	–	18,9	41,1	45,3
П.-Ахтарск	–	–	14,1	23,8	35,5
Темрюк	–	–	8,7	11,2	33,0
Опасное	3,3	11,1	10,6	20,5	34,2
Мысовое	–	–	22,3	39,4	63,9

В результате совместного воздействия переменного и постоянного ветров максимальные сгоны становятся больше, чем в установившемся режиме и при отсутствии стационарных течений. Для всех рассматриваемых ветров максимальные сгоны имеют место в Геническе: 12,2 см (W_{st}^1), 51,7 см (W_{st}^2), 42,5 см (W_{SKIRON}), 76,5 см ($W_{st}^1 + W_{SKIRON}$) и 87 см ($W_{st}^2 + W_{SKIRON}$). Минимальные сгоны возникают в Опасном: 3,3 см (W_{st}^1), 11,1 см (W_{st}^2) и в Темрюке: 8,7 см (W_{SKIRON}), 11,2 см ($W_{st}^1 + W_{SKIRON}$) и 33 см ($W_{st}^2 + W_{SKIRON}$).

2. Выполним анализ протяженности территорий возможных осушений и затоплений, возникающих под действием постоянного ветра и переменного ветра SKIRON. Зная максимальную величину сгона (нагона) и угол наклона (подъема) рельефа береговой зоны (α), определим размер максимально возможной области осушения (затопления), вызванного действием ветра в различных прибрежных районах. Для Азовского моря характерными являются углы опускания и подъема побережья от 1,5 до 3°.

В табл. 5 даны размеры участков затопления (верхняя часть таблицы) и осушения (нижняя часть), вызванных действием стационарного и прогностического ветров в прибрежных районах Азовского моря. Из анализа приведенных данных следует, что под действием ветра $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$ наибольшему затоплению (21,8 м) подвергается район Приморско-Ахтарска. При этом протяженность участка осушения в районе Геническа (16,2 м) превосходит значения, полученные для других прибрежных территорий. Сравнивая величины областей затопления и осушения для различных углов наклона береговой зоны, отметим, что при увеличении этих углов размеры районов затопления и осушения уменьшаются.

Т а б л и ц а 5

Размеры областей затопления и осушения (м) в районах станций Азовского моря в зависимости от угла наклона (α) рельефа прибрежной области

Береговые станции	W_{st}^1		W_{st}^2		W_{SKIRON}		$W_{st}^1 + W_{SKIRON}$		$W_{st}^2 + W_{SKIRON}$	
	$\alpha = 3^\circ$	$\alpha = 1,5^\circ$	$\alpha = 3^\circ$	$\alpha = 1,5^\circ$	$\alpha = 3^\circ$	$\alpha = 1,5^\circ$	$\alpha = 3^\circ$	$\alpha = 1,5^\circ$	$\alpha = 3^\circ$	$\alpha = 1,5^\circ$
Геническ	–	–	–	–	6,2	12,3	11,9	23,8	4,9	9,7
Бердянск	1,9	3,7	7,1	14,2	3,2	6,5	8,5	16,9	1,7	3,5
Мариуполь	4,0	7,9	11,9	23,8	8,9	17,7	15,4	30,7	5,6	11,2
Таганрог	2,6	5,3	10,0	19,9	12,1	24,1	17,1	34,2	9,7	19,3
Ейск	1,5	3,1	8,3	16,5	14,5	29,0	19,5	39,0	7,3	14,6
П.-Ахтарск	1,9	3,9	5,1	10,3	15,4	30,7	17,4	34,8	10,9	21,8
Темрюк	–	–	–	–	5,7	11,3	9,5	19,1	4,7	9,4
Опасное	–	–	–	–	3,1	6,2	6,5	13,0	1,8	3,6
Мысовое	2,3	4,7	9,9	19,8	3,7	7,5	6,5	13,1	2,3	4,6
Геническ	0,8	1,5	3,4	6,7	14,6	29,2	16,6	33,2	8,1	16,2
Бердянск	–	–	–	–	5,9	11,8	11,9	23,7	3,3	6,6
Мариуполь	–	–	–	–	5,0	9,9	7,6	15,2	3,5	7,0
Таганрог	–	–	–	–	8,1	16,2	13,9	27,8	5,5	11,1
Ейск	–	–	–	–	7,9	15,7	8,7	17,3	3,6	7,2
П.-Ахтарск	–	–	–	–	4,5	9,1	6,8	13,6	2,7	5,4
Темрюк	0,6	1,3	2,1	4,2	2,1	4,3	6,3	12,6	1,7	3,3
Опасное	1,9	3,7	7,1	14,2	3,9	7,8	5,8	11,5	2,0	4,0
Мысовое	–	–	–	–	7,5	15,1	12,2	24,4	4,3	8,5

Так, если $\alpha = 3^\circ$, наибольшие затопления имеют место при $W_{st}^{1,2}$ в Мариуполе (4 и 11,9 м), при W_{SKIRON} – в Приморско-Ахтарске (15,4 м), при $W_{st}^{1,2} + W_{SKIRON}$ – в Ейске (19,5 м) и в Приморско-Ахтарске (10,9 м) соответственно. Если $\alpha = 1,5^\circ$, наибольшие затопления возникают при $W_{st}^{1,2}$ в Мариуполе (7,9 и 23,8 м), при W_{SKIRON} – в Приморско-Ахтарске (30,7 м), при $W_{st}^{1,2} + W_{SKIRON}$ – в Ейске (39 м) и в Приморско-Ахтарске (21,8 м) соответственно. При W_{SKIRON} и $W_{st}^{1,2} + W_{SKIRON}$ наибольшие осушения для всех значений углов α наблюдаются в Геническе. Так, при $\alpha = 1,5^\circ$ размеры этих областей равны 29,2; 33,2 и 16,2 м соответственно.

3. Сравним результаты моделирования и натурных измерений уровня моря, приведенных в таблицах ежечасных данных высот уровня Государственной метеорологической службой Украины за период 8 – 18 сентября 2007 г. Проведем оценку рассчитанных значений экстремальных отклонений уровня, вызванных ветром W_{SKIRON} , и ежечасных данных из указанных таблиц. В Геническе величина расчетного максимума составляет 25,4 см, что на 4,7 см (16%) меньше, чем по данным наблюдений. В Мариуполе найденный в результате расчетов максимальный нагон (29,3 см) на 4 см (12%) меньше измеренного. Отсюда следует, что амплитуды колебаний уровня, полученные по натурным данным и путем численных расчетов, отличаются незначительно. При этом разница максимумов сгонов и нагонов может быть объяснена определенными погрешностями при измерениях и вычислениях.

4. Целью следующих численных экспериментов является оценка влияния рассматриваемых полей ветра и возникающих при этом течений на распространение пассивной примеси, поступающей в центральный район моря. Начальное положение выброса на расчетной сетке модели было выбрано при $x_0 = 180$ км, $y_0 = 120$ км, где глубина моря составляет 12 м. Выброс примеси имеет вид цилиндрической области радиусом R и глубиной h_1 ($0 \geq z \geq h_1$, где h_1 – шаг по вертикали в поверхностном слое). При этом начальное значение концентрации постоянно в данной области и равно единице ($C(x, y, z, t_0) = C_0(x, y, z) = 1$).

Момент времени выброса загрязнения в экспериментах зависит от полей действующего ветра. Так, для $W_{st}^{1,2}$ это время совпадает с моментом установления движения жидкости ($t_0 = t_1$), равным 38 и 43 ч соответственно. Для W_{SKIRON} момент выброса происходит в 0 ч 11 сентября 2007 г. ($t_0 = 72$ ч). Для $W_{st}^{1,2} + W_{SKIRON}$ это время определяется следующим образом: $t_0 = t_1 + 72$ ч. При анализе времени распространения и рассеивания примеси принимаем, что во всех случаях момент выброса соответствует начальному значению $t_0 = 0$.

В табл. 6 приведены коэффициент максимального распространения пассивной примеси (K_{max}) с соответствующим ему моментом времени (t_{max} , ч) и время полного рассеивания (t_d , ч) примеси для двух скоростей постоянного ветра, прогностического ветра и их совместного действия. Рассматриваются горизонты ($z = 0$; $z = -H/2$ и $z = -H + h_2$), на которых прослеживаются тенденции эволюции примеси.

Параметры эволюции распространения примеси на различных глубинах
Азовского моря при постоянном ($W_{st}^1 = 5$ м/с, $W_{st}^2 = 10$ м/с)
и прогностическом ветрах, а также при их совместном действии

Глубина, м	Максимальные значения	W_{st}^1	W_{st}^2	W_{SKIRON}	$W_{st}^1 + W_{SKIRON}$	$W_{st}^2 + W_{SKIRON}$
$z = 0$	K_{max}	1,14	1,18	1,25	1,30	1,32
	t_{max}	5,7	4,9	31	40	40
	t_d	17,3	18,2	57,1	84,5	86,5
$z = -H/2$	K_{max}	1,16	1,18	1,27	1,33	1,35
	t_{max}	14,3	14,7	34	42	42
	t_d	36,7	37,6	104	106	110
$z = -H + h_2$	K_{max}	1,16	1,19	1,33	1,37	1,38
	t_{max}	26,9	25,5	55	58	59
	t_d	53,4	55,2	108	110	115

Согласно приведенным данным, площадь распространения области загрязнения зависит от скорости ветра, приводящего к установившемуся движению. Для большей скорости постоянного ветра (W_{st}^2) становятся больше скорости течений (табл. 2), при этом увеличиваются площадь распространения примеси и время ее полного рассеивания (табл. 5). В связи с этим совместное действие стационарного и прогностического ветров также приводит к увеличению области загрязнения.

Из табл. 6 видно, что наибольшая площадь загрязнения имеет место при максимальном значении скорости действующего ветра $W_{st}^2 + W_{SKIRON}$. В этом случае на свободной поверхности $K_{max} = 1,32$ через 40 ч после выброса примеси. При этом время ее полного рассеивания (t_d) составляет 86,5 ч. Наибольшая площадь области загрязнения на глубине $z = -H/2$ достигается спустя 42 ч после выброса примеси ($K_{max} = 1,35$). Полное рассеивание загрязнения на этой глубине происходит через 110 ч. В придонном слое ($z = -H + h_2$) максимальное значение коэффициента распространения области загрязнения (1,38) отмечено в момент времени $t_{max} = 59$ ч. При этом спустя 115 ч с момента выброса примеси ее концентрация во всей акватории моря не превышает 2,5% от начального значения ($C_d = 2,5 \cdot 10^{-2}$).

Заключение

В работе представлены результаты численных экспериментов расчета сгонно-нагонных явлений и распространения пассивной примеси системой течений, вызванных воздействием постоянного и переменного ветра SKIRON в Азовском море. Точность полученных результатов подтверждена сравнением значений экстремальных сгонов и нагонов с натурными данными, полученными по измерениям уровня на береговых станциях.

Представлены таблицы величин сгонов и нагонов, скоростей течений, размеров затоплений и осушений, генерируемых действием нестационарного и постоянного ветров. При этом показано, что наибольшие нагоны имеют место в районах Таганрога, Приморско-Ахтарска и Ейска, а максимальные сгоны – в Геническе. Построены карты уровня Азовского моря, сделаны выводы о зависимости эволюции пассивной примеси от скорости стационарного ветра и действия переменного неоднородного ветра. Установлено, что полное рассеивание примеси быстрее происходит в поверхностном слое и медленнее – в придонном. Выполнен анализ протяженности территорий возможных осушений и затоплений в зависимости от рельефа береговой зоны и скорости постоянного ветра, а также от его совместного действия с ветром SKIRON.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Фомин В.В., Шульга Т.Я.* Исследование волн и течений, возникающих под действием ветра в Азовском море // Там же. – 2006. – № 12. – С. 110 – 115.
3. *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.
4. *Фомин В.В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ. – 2002. – Вып. 249. – С. 246 – 255.
5. *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.
6. *Kallos G., Kotroni V., Lagouvardos K.* The regional weather forecasting system SKIRON // Proc. Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments. – Univ. of Athens. – ISBN:960-8468-22-1.
7. *Сретенский Л.Н.* Теория волновых движений жидкости. – М.: Наука, 1977. – 815 с.
8. *Черкесов Л.В., Иванов В.А., Хартиев С.М.* Введение в гидродинамику и теорию волн. – СПб.: Гидрометеоздат, 1992. – 264 с.
9. *Courant R., Friedrichs K.O., Lewy H.* On the partial difference equations of mathematical physics // IBM J. – 1967, March. – P. 215 – 234.
10. *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 25.01.12
После доработки 26.06.12

АНОТАЦІЯ З використанням тривимірної нелінійної математичної моделі вивчаються динамічні процеси та особливості трансформації домішки в Азовському морі, викликані дією змінного вітру та атмосферного тиску за наявності стаціонарних течій. На підставі результатів чисельних розрахунків зроблені висновки про вплив величин швидкостей стаціонарних течій на максимальні відхилення рівня та швидкості нестационарних течій, які генеруються полями вітру, отриманими за атмосферою моделлю SKIRON. Виконаний аналіз впливу зміни інтенсивності стаціонарних течій на розміри областей осушення та затоплення в прибережних

ISSN 0233-7584. Мор. гидрофиз. журн., 2013, № 3 23

районах моря залежно від кута нахилу (підйому) рельєфу берегової зони. Показано, що спільна дія постійного вітру та вітру прогностичної моделі SKIRON призводять до істотного збільшення площі поширення пасивної домішки та часу її розсіювання в порівнянні з дією лише стаціонарних течій.

Ключові слова: чисельне моделювання, σ -координатна модель, динамічні процеси, стаціонарні течії, області осушення та затоплення, еволюція пасивної домішки.

ABSTRACT Dynamic processes and features of impurity transformation in the Sea of Azov induced by the impact of variable wind and atmospheric pressure at presence of stationary currents are studied using three-dimensional mathematical model. The results of numerical calculations provide the grounds for drawing the conclusions on influence of the values of stationary currents' velocities upon maximum deviations of level and velocity of non-stationary currents generated by the SKIRON model-derived wind fields. Influence of variation of stationary currents' intensity upon the area of drainage and flood zones in the coastal regions depending on the slope (rise) angle of the waterside relief is analyzed. It is shown that joint action of permanent wind and that of the prognostic model SKIRON results in substantial increase of the area of passive impurity distribution and the time of its dissipation as compared to the influence of stationary currents only.

Keywords: numerical modeling, σ -coordinate model, dynamic processes, stationary currents, drainage and flood zones, evolution of passive impurity.