ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ И СГОННО-НАГОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В АЗОВСКОМ МОРЕ, ВЫЗЫВАЕМЫХ ДЕЙСТВИЕМ ПРОГНОСТИЧЕСКОГО ВЕТРА

В.А. Иванов, А.И. Задорожный, С.С. Нечаев, Л.В. Черкесов, Т.Я. Шульга

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
E-mail: otw@alpha.mhi.iuf.net

С использованием прогностических полей приводного ветра и атмосферного давления на основе трехмерной нелинейной модели проведен анализ сгонно-нагонных явлений в Азовском море. Выполнено сравнение результатов численных расчетов с данными прямых измерений уровня моря на ряде береговых станций. Исследовано влияние изменения интенсивности атмосферных воздействий на максимальные значения отклонений уровня и скорости течений.

Введение. Возрастающее в последние десятилетия освоение энергетических и биологических ресурсов Мирового океана выдвигает особые требования к прогнозам динамических характеристик морской среды: уровня моря, течений и волнения. Важнейшим способом, позволяющим дать более полный анализ течений и колебаний уровня моря, является применение методов математического моделирования и сравнение их результатов с данными натурных наблюдений.

В работе [1] с использованием трехмерной нелинейной модели анализируются динамические процессы и эволюция примеси в Азовском море, возникающие под действием возмущений, вносимых в поле стационарных течений перемещающимся циклоном. В [2] эта модель применена для изучения волн и течений, возникающих в Азовском море под действием постоянного по времени и однородного по пространству ветра.

В данной работе исследуются динамические процессы в Азовском море, вызываемые переменными по пространству и времени полями приводного ветра и атмосферного давления, полученными по данным региональной прогностической модели *Skiron* [3]. Результаты численных расчетов колебаний уровня сравниваются с данными натурных наблюдений на гидрометеорологических станциях Азовского моря.

Постановка задачи. Для расчета используются нелинейные уравнения движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [4]. На свободной поверхности выполняются кинематическое и динамические условия. На дне нормальная составляющая скорости обращается в ноль. Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью, на боковых границах удовлетворяется условие прилипания. В начальный момент времени движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна.

В исходных уравнениях, граничных и начальных условиях осуществляется переход от координаты z к σ-координате. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам соответствует критерию устойчивости Куранта для баротропных волн.

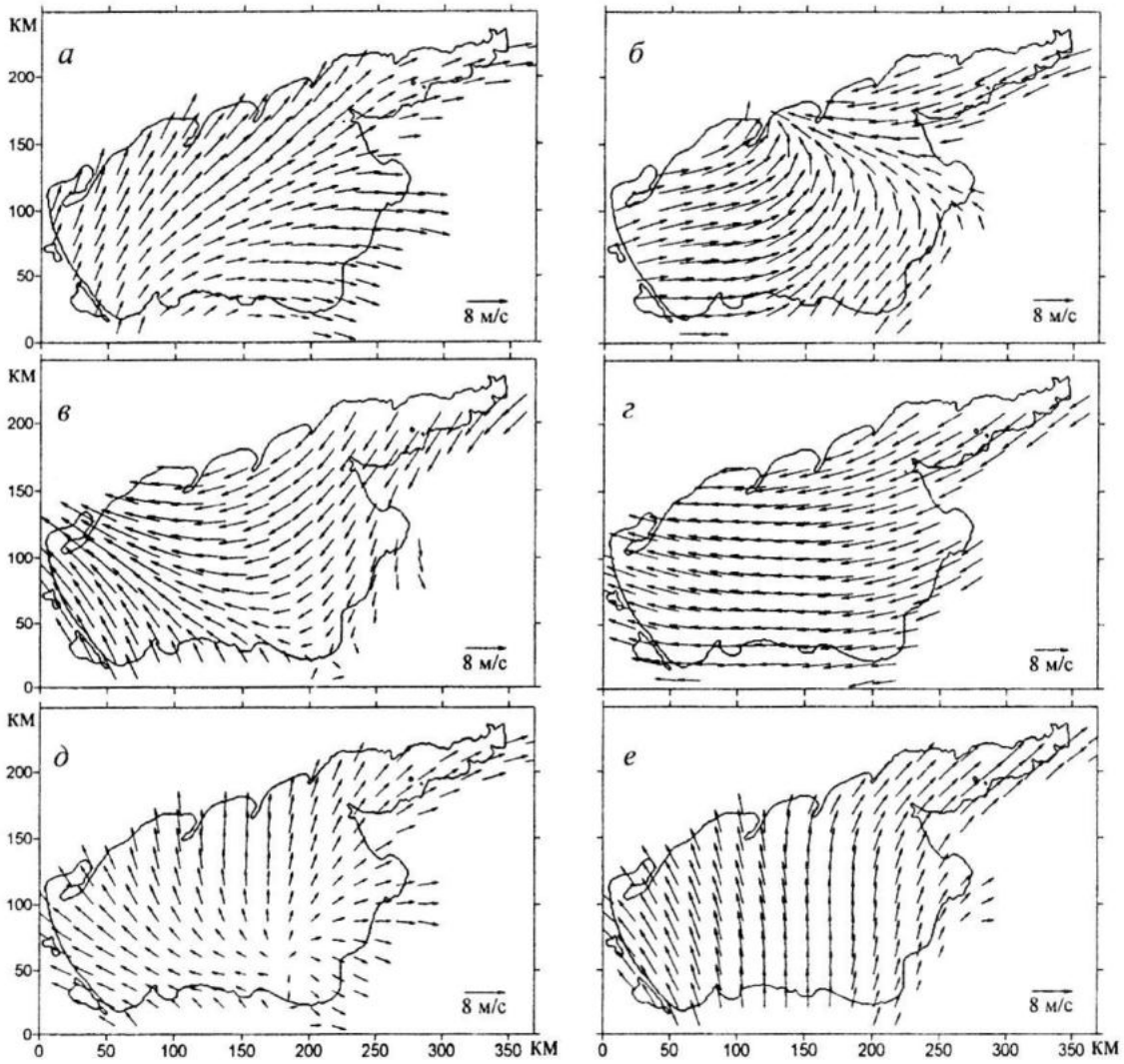
Рельеф дна и конфигурация береговой линии Азовского моря, используемые для проведения численных экспериментов, интерполированы на расчетную сетку с навигационных карт. В качестве входных метеорологических данных берутся поля приводного ветра и атмосферного давления модели *Skiron* за период с 8 по 18 сентября 2007 г ($\mathbf{W}_{Skiron}$; P_{Skiron}). Пространственное разрешение атмосферных полей составляет 10 км, дискретность по времени – 2 часа. Моделирование динамических процессов в Азовском море, вызываемых действием прогностического ветра, проводится от ноля часов 8 сентября в течение 10-ти суток. Результаты, полученные для первых трех суток, не анализируются и применяются для получения начальных данных о скоростях течений и уровне моря на ноль часов 11 сентября 2007 г.

Величины сгонов и нагонов, найденные численно сравниваются с результатами наблюдений уровня моря на береговых гидрометеорологических станциях Азовского моря за тот же период. Эти данные представляет собой ежечасные измерения уровня с помощью самописцев на станциях Геническ и Мариуполь.

Анализ результатов численных экспериментов. Для изучения физических закономерностей влияния атмосферных воздействий на скорости течений и сгонно-нагонные процессы в Азовском море выполнен ряд численных экспериментов, в которых в качестве возмущений выбраны скорости ветра, приведенные в модели *Skiron*, а также увеличенные и уменьшенные в два раза.

На рис. 1 представлены векторные поля ветра над Азовским морем, которые соответствуют экстремальным значениям его скорости или резким переменам направления. Первая экстремальная ситуация возникает через 36 ч (рис. 1, *а*).

При этом над южной частью отмечается антициклоническое воздействие, а скорость ветра достигает на отдельных участках 10 м/с.



Р и с. 1. Поля прогностического ветра в различные моменты времени: 36 ч (*а*), 68 ч (*б*); 90 ч (*в*); 140 ч (*г*); 152 ч (*д*); 168 ч (*е*)

Через 68 ч со скоростью 15 – 20 м/с перемещаются два небольших циклона (рис. 1, *б*), которые формируются в восточной и западных частях моря.

Следующие максимумы скоростей ветра приходятся на 90 ч и 140 ч, которые соответствуют обширным циклоническим образованиям (рис. 1, *в*, *г*). На рис. 1, *д*, *е* показаны направления полей ветра в 152 ч и 168 ч и соответствующие им экстремумы скорости. После этого до 18 сентября над Азовским морем скорость ветра уменьшается и его направление практически не меняется.

Анализ результатов многолетних наблюдений атмосферных возмущений удовлетворительно согласуются с данными модели *Skiron*, приведенными в табл. 1. Здесь представлены значения максимальных скоростей и направлений

ветра как функции времени (над Азовским морем) за период интегрирования. При этом между двумя соседними значениями времени скорость ветра меняется монотонно. Величина отклонения вектора скорости ветра от направления оси x указана в градусах. Отсюда видно, что за указанное время (168 ч) средняя величина его максимальной скорости равна 6,7 м/с, наибольшая – 12,7 м/с, наименьшая – 1,6 м/с. Преобладающими направлениями ветра являются северо-восточное и северо-западное.

Таблица 1

Максимальные скорости ветра как функции времени, полученные по данным модели *Skiron* с 11 по 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	168	5,8	200

В табл. 2 приведены данные о максимумах нагонов (верхняя часть таблицы) и сгонов (нижняя часть таблицы) на береговых станциях Азовского моря, вызванных действием прогностического и модельного ($\frac{1}{2}\mathbf{W}_{Skiron}$ и $2\mathbf{W}_{Skiron}$) ветров.

Таблица 2

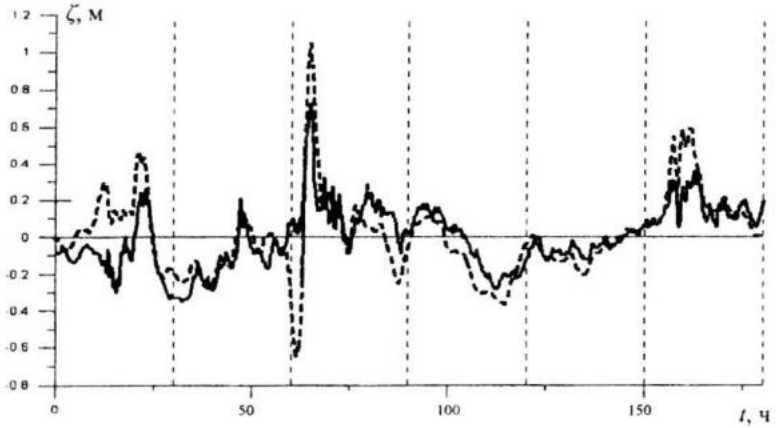
Максимальные нагоны, сгоны и время их достижения на береговых станциях Азовского моря при наличии прогностического и модельного ветра

	Береговые станции	Скорость ветра					
		$\frac{1}{2}\mathbf{W}_{Skiron}$		$\mathbf{W}_{Skiron}$		$2\mathbf{W}_{Skiron}$	
		$\lvert\zeta_{max}\rvert$, см	t, ч	$\lvert\zeta_{max}\rvert$, см	t, ч	$\lvert\zeta_{max}\rvert$, см	t, ч
Нагоны	Геническ	20,0	33,6	25,4	34	32,2	34,6
	Бердянск	4,9	161,2	9,1	161,5	16,9	162,0
	Мариуполь	18,5	129,0	29,3	129,2	46,4	130
	Таганрог	40,6	162,1	50,6	162,4	63,1	162,6
	Ейск	19,1	141,5	38,1	142,1	76,0	143
	П.-Ахтарск	40,6	141,6	57,1	142,3	80,4	142,8
	Темрюк	20,2	140,0	24,5	140,5	29,7	141
	Опасное	5,5	122,1	9,4	122,5	16,1	122,1
	Мысовое	7,5	34,0	12,1	34,6	19,6	36
Сгоны	Геническ	22,3	131,6	42,5	132,2	76,5	132
	Бердянск	9,7	131,3	17,3	131,5	30,9	132
	Мариуполь	12,7	29,0	18,2	29,4	26,0	30
	Таганрог	21,2	39,5	29,0	40,0	42,4	39,6
	Ейск	8,7	41,7	18,9	42,1	41,1	43
	П.-Ахтарск	8,4	32,1	14,1	32,2	23,8	33,0
	Темрюк	6,8	165,7	8,7	166,2	11,2	166
	Опасное	5,5	162,2	10,6	162,6	20,5	162,8
	Мысовое	12,6	161,5	22,3	161,8	39,4	162,2

Из анализа этих данных следует, что наибольшие нагоны, генерируемые прогностическим ветром, достигаются на станции Приморско-Ахтарск (57,1 см). Здесь для модельного ветра ($2\mathbf{W}_{Skiron}$) максимальный нагон равен 80,4 см, при уменьшении интенсивности ветра в два раза ($\frac{1}{2}\mathbf{W}_{Skiron}$) максимум нагона составляет 40,6 см. Наибольшие сгоны для прогностического ветра (42,5 см) имеют место в Геническе. При этом увеличение и уменьшение интенсивности атмосферных воздействий в 2 раза приводят к их росту в 1,8 раза и уменьшению в 1,9 раза соответственно.

Выполним сравнение результатов моделирования и натурных измерений уровня моря, приведенных Государственной метеорологической службой Украины за сентябрь 2007 г в таблицах ежечасных данных высот уровня. Оценим отклонения его экстремальных значений, рассчитанных для полей прогностического ветра и полученных из указанных таблиц.

Графики зависимостей уровня моря от времени на станции Геническ, полученные по данным наблюдений и по модели, показаны на рис. 2.



Р и с. 2. Изменения уровня Азовского моря на ст. Геническ. Сплошная линия – данные измерений, штриховая – результаты моделирования

Видно, что общие черты колебаний уровня моря в основном совпадают. Некоторые отличия, например, по величинам максимумов сгонов и нагонов могут быть объяснены определенными погрешностями при измерениях и вычислениях.

В Геническе величина расчетного максимума составляет 25,4 см, что на 5,7 см (18 %) меньше, чем по данным наблюдений. В Мариуполе найденный в результате расчетов максимальный нагон (29,3 см) на 4,1 см (12 %) меньше измеренного.

При увеличении скорости ветра в 2 раза ($2\mathbf{W}_{Skiron}$) максимумы скоростей течений на горизонтах 1, 3, 5 и 8 м возрастают в 1,2; 1,3; 1,4 и 1,3 раза. При двукратном уменьшении скорости ветра ($\frac{1}{2}\mathbf{W}_{Skiro}$) максимумы скоростей течений на этих горизонтах уменьшаются в 1,4; 1,8; 1,4 и 1,3 раза соответственно.

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 // Доповіді НАНУ. – 2006. – № 11. – С. 109 – 113.
2. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Моделирование колебаний уровня Азовского моря, вызываемых ветром // Морской гидрофизический журнал. – 2008. – № 6. – С. 53 – 65.
3. *Weather and Wave Forecast for Greece, Europe* – Mediterranean Sea. – http://forecast.uoa.gr.
4. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of three dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coast Ocean Models. Coastal and Estuarine Science, 4, 1987. – P. 1 – 16.