

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

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь*

### **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АЗОВСКОМ МОРЕ**

С использованием прогностических полей приводного ветра и атмосферного давления на основе трехмерной нелинейной математической 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, а также на особенности трансформации примеси. Анализ результатов численных расчетов позволил сделать выводы о зависимости времени рассеяния загрязнений от скорости ветра и расположения районов загрязнений.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *скорость течения, сгонно-нагонные явления, прогностические поля ветра, трехмерная нелинейная математическая модель.*

**Введение.** Возрастающее в последние десятилетия освоение энергетических и биологических ресурсов Мирового океана выдвигает особые требования к прогнозам важнейших динамических характеристик морской среды: уровня моря, течений и волнения. Важнейшим способом, позволяющим изучать сгонно-нагонные процессы, является метод численного моделирования. При этом наибольшие сложности вызывает исследование волн и морских течений. В настоящее время информация о полях течений на различных горизонтах, приводимая по данным наблюдений, является не полной, вследствие сравнительно небольшого количества измерений. Одним из способов, позволяющих дать более полный анализ течений и колебаний уровня моря, является применение методов математического моделирования и использование данных натуральных наблюдений.

В работе [1] в рамках двумерной линейной модели исследована реакция уровенной поверхности и скоростей течений на прохождение циклонов над Азовским морем. В [2] 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 работе [3] 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 изучаются динамические процессы в Азовском море, вызываемые переменными по пространству и времени полями приводного ветра и атмосферного давления, полученными с использованием региональной прогностической модели *SKIRON* [4]. Дан анализ влияния возникающих при этом течений на трансформацию загрязняющих веществ. Результаты численных расчетов колебаний уровня сравниваются с данными натуральных

© В.А. Иванов, Л.В. Черкесов, Т.Я. Шульга, 2011

наблюдений на станциях Геническ и Мариуполь. Для выполнения этого исследования использована нелинейная трехмерная сигма-координатная модель.

**Постановка задачи. Граничные и начальные условия.** Введем систему координат, в которой ось  $x$  направлена на восток,  $y$  – на север,  $z$  – вертикально вверх. Нелинейные уравнения движения однородной несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды имеют вид [5, 6]:

$$\frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{11}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{12}) + \frac{\partial}{\partial z} K_M \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\tau_{21}) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{22}) + \frac{\partial}{\partial z} K_M \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + g\rho = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (4)$$

В соотношениях (1) – (4) все обозначения общеприняты.

Компоненты тензора турбулентных напряжений Рейнольдса  $\tau_{ij}$  в (1) и (2) определяются через градиенты скоростей по формулам

$$\tau_{11} = 2A_M \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{12} = \tau_{21} = A_M \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad \tau_{22} = 2A_M \frac{\partial v}{\partial y}. \quad (5)$$

Коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости  $A_M$  вычисляется по формуле Смагоринского [7]. Для параметризации коэффициента вертикальной турбулентной вязкости  $K_M$  используется теория Меллора-Ямады [8].

На свободной поверхности имеют место два граничных условия:

$$w|_{z=\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad (6)$$

$$K_M \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=\zeta} = (\tau_{0x}, \tau_{0y}), \quad (7)$$

где  $\tau_{0x} = C_a W_x |\mathbf{W}|$  и  $\tau_{0y} = C_a W_y |\mathbf{W}|$  – проекции касательных напряжений ветра,  $W_x$ ,  $W_y$  – компоненты вектора скорости ветра  $\mathbf{W}$  на высоте 10 м над уровнем моря.

Для численных расчетов коэффициент поверхностного трения  $C_a$  выбран в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [9].

На боковых границах выполняется условие прилипания. На дне ( $z = -H(x, y)$ ) нормальная составляющая скорости равна нулю:

$$\left( w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) \Big|_{z=-H} = 0. \quad (8)$$

Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [6]:

$$K_M \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H} = (\tau_{1x}, \tau_{1y}), \quad (9)$$

где  $\tau_{1x} = C_b u \sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $\tau_{1y} = C_b v \sqrt{u^2 + v^2}$ .

Коэффициент донного трения  $C_b$  в (9) находится по формуле

$$C_b = k^2 \ln^{-2}(z_2/z_0).$$

где  $z_2$  – шаг по вертикали в придонном слое,  $z_0 = 0,003$  м – параметр шероховатости, характеризующий свойства подстилающей донной поверхности.

В начальный момент времени  $t=0$  движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна:

$$u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \quad w(x, y, z, 0) = 0, \quad \zeta(x, y, z, 0) = 0. \quad (10)$$

Для расчета изменения концентрации примеси нейтральной плавучести  $C(x, y, z, t)$  используем уравнение переноса и диффузии [6]

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (11)$$

где  $A_H$  и  $K_H$  – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии.

Область загрязнения при  $t = t_0$  ( $t_0$  – соответствует 0 ч 11 сентября 2007 г.) расположена в поверхностном слое и имеет вид пятна радиуса  $R$ :

$$C(x, y, z, t_0) = \begin{cases} 1, & r \leq R, \quad 0 \geq z \geq -z_1, \\ 0, & r > R, \quad z < 0; \quad r \leq R, \quad z < -z_1. \end{cases} \quad (12)$$

где  $C(x, y, z, t)$  – концентрация загрязнения,  $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$  – расстояние от центра начальной области загрязнения  $(x_0, y_0)$  до точки, в которой вычисляется концентрация,  $z_1$  – толщина этой области.

Загрязнение в момент времени  $t = t_d$  считается рассеявшимся при условии, что максимум концентрации ( $C_{\max} = C_d$ ) во всей жидкости становится равным  $2,5 \cdot 10^{-2}$ .

На свободной поверхности, на дне и боковых стенках ( $S$ ) выполняются условия отсутствия потоков загрязнения в направлении внешней нормали  $n$ :

$$K_H \frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{z=\zeta} = 0, \quad K_H \frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{z=-H}, \quad A_H \frac{\partial C}{\partial n} \Big|_S = 0. \quad (13)$$

**Численная реализация модели и выбор параметров.** В исходных уравнениях (1) – (4), граничных (6) – (9), (13) и начальных (10) условиях осуществляется переход от координаты  $z$  к  $\sigma$ -координате [2, 3]:

$$x^* = x, y^* = y, \sigma = (z - \zeta)/(H + \zeta), t^* = t,$$

где  $-1 \leq \sigma \leq 0$ .

В численных экспериментах используются равномерные шаги по горизонтальным координатам  $\Delta x = \Delta y = 1\ 350$  м. Количество расчетных уровней по вертикали равно 11. Уравнения для определения осредненных двумерных компонент скорости и уровня моря решаются с шагом  $\Delta t = 18$  с [10]. Для вычисления отклонений от найденных средних и вертикальной компонент скорости используется шаг  $10\Delta t$  [11].

На рис. 1 показан рельеф дна в расчетной области, снятый с навигационных карт. В процессе вычислений он интерполируется на расчетную сетку.

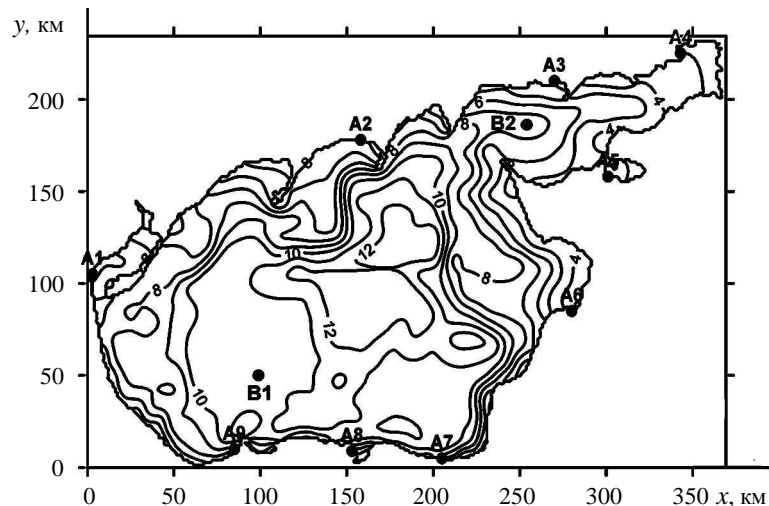


Рис. 1. Рельеф дна (м) Азовского моря, положение прибрежных пунктов (A1 – Геничск, A2 – Бердянск, A3 – Мариуполь, A4 – Таганрог, A5 – Ейск, A6 – Приморско-Ахтарск, A7 – Темрюк, A8 – Опасное, A9 – Мысовое) и центров загрязнений (B1, B2).

Отклонения уровня моря анализируются нами в девяти районах, расположенных вблизи крупных населенных пунктов морского побережья, которые отмечены на рис. 1 символами A1 – A9.

#### **Анализ результатов численных экспериментов**

**1.** В качестве входных метеорологических данных нами взяты поля приводного ветра и атмосферного давления, полученные с помощью модели *Skiron* на период с 8 по 18 сентября 2007 г ( $W_{SKIRON}$ ,  $P_{SKIRON}$ ). Пространственное разрешение атмосферных полей составляет 10 км, дискретность по времени 2 часа [4]. Моделирование динамических процессов в Азовском море, вызываемых действием прогностического ветра, проводится от нуля часов 8 сентября 2007 г. в течение 10-ти суток. Результаты, полученные для первых трех суток, не анализируются и используются для определения на-

чальных данных о скоростях течений и уровне моря на ноль часов 11 сентября 2007 г.

На рис. 2 представлены векторные поля ветра над Азовским морем, которые соответствуют экстремальным значениям его скорости или резким переменам направления.

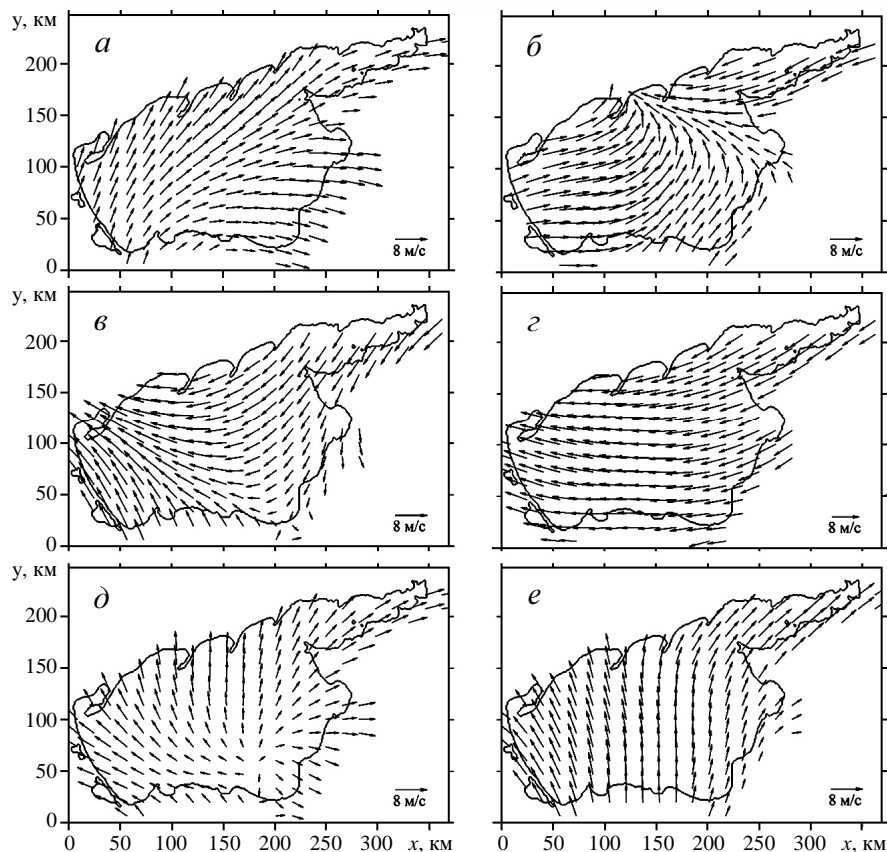


Рис. 2. Поля прогностического ветра в различные моменты времени: *a* – 36 ч; *б* – 68 ч; *в* – 90 ч; *г* – 140 ч; *д* – 152 ч; *е* – 168 ч.

Первая экстремальная ситуация возникает через 36 ч (см. рис. 2, *a*). При этом над южной частью отмечается антициклоническое воздействие, в северной части моря скорость ветра достигает на отдельных участках 10 м/с. Через 68 ч со скоростью 15 – 20 м/с перемещаются два небольших циклона (см. рис. 2, *б*), которые формируются в восточной и западной областях моря. Следующие максимумы скоростей ветра приходятся на моменты времени 90 ч и 140 ч, которые соответствуют обширным циклоническим образованиям (см. рис. 2, *в*, *г*). На рис. 2, *д*, *е* показаны направления ветра в моменты времени 152 ч и 168 ч и соответствующие им экстремумы скорости. Далее до 18 сентября над Азовским морем скорость ветра уменьшается и его направление не меняется.

При проведении численных расчетов выполняется сравнение найденных при моделировании величин сгонов и нагонов с данными наблюдений

измерений уровня моря на береговых гидрометеорологических станциях Азовского моря за период с 11 по 18 сентября 2007 г. Эти данные представляет собой ежечасные измерения уровня моря на станциях Геническ и Мариуполь, регистрируемые с помощью самописцев.

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.

2. Анализ информации о характерных типах погоды для района Азовского моря [12, 13] свидетельствует о том, что в теплый период года (апрель-октябрь) наблюдается 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.

Данные о направлениях и величинах ветра, взятые в качестве входных метеорологических данных, рассчитанных методами ре-анализа в рамках модели *SKIRON*, удовлетворительно согласуются с результатами многолетних наблюдений атмосферных возмущений [12, 13]. В табл. 1 представлены значения максимальных скоростей и соответствующих им направлений ветра как функции времени (над Азовским морем) с 11 по 18 сентября 2007 г. При этом между двумя соседними значениями времени скорость ветра меняется монотонно. Величина отклонения вектора скорости ветра от направления оси  $x$  указана в градусах.

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	192	5,8	200

Отсюда видно, что за указанное время (192 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.

В серии численных экспериментов нами исследуется влияние скорости переменного по времени и пространству ветра на изменения уровня и скоростей генерируемых им течений. В табл. 2 приведены данные о максимальных величинах нагонов, а в табл. 3 – о максимальных величинах сгонов на береговых станциях Азовского моря, вызванных действием прогностического ( $W_{SKIRON}$ ) и модельного ( $\frac{1}{2}W_{SKIRON}$  и  $2W_{SKIRON}$ ) ветра.

Таблица 2. Максимальные величины нагонов и время их достижения на береговых станциях Азовского моря при наличии прогностического и модельного ветра.

Береговые станции	Скорость ветра					
	$\frac{1}{2}W_{SKIRON}$		$W_{SKIRON}$		$2W_{SKIRON}$	
	$ \zeta_{max} $ , см	$t$ , ч	$ \zeta_{max} $ , см	$t$ , ч	$ \zeta_{max} $ , см	$t$ , ч
Геническ	20,0	33,6	25,4	34,0	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	130,0
Таганрог	40,6	162,1	50,6	162,4	63,1	162,6
Ейск	19,1	141,5	38,1	142,1	76,0	143,0
Приморско-Ахтарск	40,6	141,6	57,1	142,3	80,4	142,8
Темрюк	20,2	140,0	24,5	140,5	29,7	141,0
Опасное	5,5	122,1	9,4	122,5	16,1	122,1
Мысовое	7,5	34,0	12,1	34,6	19,6	36,0

Таблица 3. Максимальные величины сгонов и время их достижения на береговых станциях Азовского моря при наличии прогностического и модельного ветра.

Береговые станции	Скорость ветра					
	$\frac{1}{2}W_{SKIRON}$		$W_{SKIRON}$		$2W_{SKIRON}$	
	$ \zeta_{max} $ , см	$t$ , ч	$ \zeta_{max} $ , см	$t$ , ч	$ \zeta_{max} $ , см	$t$ , ч
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
Приморско-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 ( $2W_{SKIRON}$ ) максимальный нагон равен 80,4 см, при уменьшении интенсивности ветра в два раза ( $\frac{1}{2}W_{SKIRON}$ ) максимум нагона составляет 40,6 см. Наибольшие сгоны для прогностического ветра (42,5 см) имеют место в Геническе. При этом увеличение и уменьше-

ние интенсивности атмосферных воздействий в 2 раза приводят к их росту в 1,8 раза и уменьшению в 1,9 раза соответственно.

Сравним между собой результаты моделирования и натуральных 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. В Генчешке 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.

В табл. 4 представлены данные о наибольших значениях скоростей течений в Азовском море, вызванных действием прогностического ( $W_{SKIRON}$ ) и модельного ( $\frac{1}{2}W_{SKIRON}$  и  $2W_{SKIRON}$ ) ветра. Из анализа данных, приведенных в табл. 4, следует, что при увеличении скорости ветра в 2 раза 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 максимумы скоростей течений на этих горизонтах уменьшаются в 1,4; 1,8; 1,4 и 1,3 раза соответственно.

Таблица 4. Максимальные скорости течений и время их достижения в Азовском море, при наличии прогностического и модельного ветра.

Горизонт, м	Скорость ветра					
	$\frac{1}{2}W_{SKIRON}$		$W_{SKIRON}$		$2W_{SKIRON}$	
	$ U_{max} $ , см/с	$t$ , ч	$ U_{max} $ , см/с	$t$ , ч	$ U_{max} $ , см/с	$t$ , ч
1	34,6	131,8	48,2	132,0	57,8	132,6
3	25,9	132,0	46,2	133,5	60,5	134,1
5	31,1	135,3	43,9	135,4	61,6	136,4
8	23,9	140,0	31,5	140,2	40,5	142,6

**3.** Используя результаты численных экспериментов, оценим влияние ветра и генерируемых им динамических процессов на трансформацию загрязняющих веществ, поступающих в море в различных районах. Информация о состоянии морской и прибрежной экосистем, полученная в ходе морских экспедиций на НИС Южного научного центра (ЮНЦ) РАН «Профессор Панов» и «Денеб» за период 2003 – 2006 гг., позволила оценить качество вод Азовского моря и выделить зоны экологического риска [14]. В экспедиционных рейсах выполнено экологическое картирование акватории Таганрогского залива и установлено, что значительная часть экосистемы залива находится в нарушенном состоянии.

С учетом оценки экологии Азовского моря [14] выбраны районы расположения центров выбросов загрязнений – см. рис. 1, маркеры В1 и В2. Район В1 расположен в области Восточно-Казантипского газового месторождения ( $H = 10$  м,  $x_{01} = 110$  км,  $y_{01} = 45$  км), а район В2 – в Таганрогском заливе ( $H = 8$  м,  $x_{02} = 260$  км,  $y_{02} = 170$  км). Выброс загрязнений происходит в поверхностном слое в момент времени  $t = t_0$  в областях радиусом 9 км. Для расчета диффузии примеси нейтральной плавучести (см. уравнение (11))



выбраны значения  $A_H$  и  $K_H$  равные  $10 \text{ м}^2/\text{с}$  и  $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  соответственно [11]. Для количественной оценки изменения площадей загрязнения с течением времени в поверхностном слое ( $0 \geq z \geq -z_1$ ), в районе половины глубины бассейна ( $z = -H/2 = h_1$ ) и в придонном слое ( $-H \leq z \leq h_2$ , где  $h_2 = -H + z_2$ ) используем коэффициент  $K_{\max}$ , который рассчитываем как отношение максимальной площади  $S_{\max}$ , ограниченной изолинией концентрации примеси  $C_d$  в момент времени  $t = t_{\max}$ , к площади начального загрязнения  $S_0$  ( $K_{\max} = S_{\max}/S_0$ ).

В табл. 5 для указанных выше районов приведены коэффициент области максимального распространения загрязнения ( $K_{\max}$ ), время его достижения ( $t_{\max}$ , ч) и время рассеяния примеси на разных горизонтах моря ( $t = t_d$ ), вызванного действием диффузии, прогностического и модельного ветра.

Таблица 5. Параметры эволюции примеси, возникающей под действием прогностического и модельного ветра на различных глубинах в районах  $B_1$  и  $B_2$  Азовского моря.

Глубина	Значения $K_{\max}$ , $t_{\max}$ и $t_d$	$1/2 W_{SKIRON}$		$W_{SKIRON}$		$2W_{SKIRON}$	
		$B_1$	$B_2$	$B_1$	$B_2$	$B_1$	$B_2$
$0 \geq z \geq -z_1$	$K_{\max}$	1,14	1,17	1,19	1,27	1,22	1,36
	$t_{\max}$ , ч	4	5	3	4	3	4
	$t_d$ , ч	18	19	17	18	17	18
$z = h_1$	$K_{\max}$	1,17	1,21	1,18	1,25	1,23	1,60
	$t_{\max}$ , ч	13	13	10	10	10	11
	$t_d$ , ч	35	36	34	35	33	34
$-H \leq z \leq h_2$	$K_{\max}$	1,12	1,35	1,17	1,46	1,22	1,52
	$t_{\max}$ , ч	23	23	21	22	15	16
	$t_d$ , ч	56	57	55	56	63	65

Из анализа данных, представленных в табл. 5, следует, что для районов  $B_1$  и  $B_2$  максимальная площадь загрязнения возникает под действием ветра наибольшей скорости ( $2W_{SKIRON}$ ). В районе Восточно-Казантипского газового месторождения в поверхностном слое наибольшая площадь загрязнения достигается через 3 ч после его выброса ( $K_{\max} = 1,22$ ). При этом время рассеяния примеси составляет 17 ч. На горизонт  $z = h_1$  загрязнение проникает через 2 ч после его выброса на свободную поверхность. Далее площадь загрязнения увеличивается и становится максимальной ( $K_{\max} = 1,23$ ,  $t_{\max} = 10$  ч). Рассеяние загрязнения на этой глубине происходит через 33 ч. В придонном слое ( $-H \leq z \leq h_2$ ) наибольшее значение коэффициента области распространения загрязнения (1,22) достигается при  $t_{\max} = 15$  ч. При  $t = 63$  ч примесь рассеивается (ее концентрация не превосходит  $C_d$ ).

Согласно данным, приведенным в табл. 5, при рассматриваемых ветровых условиях величины параметров, характеризующих площадь загрязняющих веществ и время их рассеивания ( $K_{\max}$  и  $t_d$ ), для района  $B_2$  больше по сравнению с их значениями для района  $B_1$ . При этом в поверхностном

слое моря в районе В2  $K_{\max} = 1,36$  ( $t_{\max} = 5$  ч), на глубине  $z = h_1$   $K_{\max} = 1,6$  ( $t_{\max} = 11$  ч), в придонном слое  $K_{\max} = 1,52$  ( $t_{\max} = 16$  ч). Время рассеяния примеси здесь также наибольшее и составляет в придонном слое 65 ч.

В районе Восточно-Казантипского газового месторождения ( $H = 10$  м) рассеяние примеси одного и того же объема происходит быстрее, чем в Таганрогском заливе ( $H = 8$  м). Здесь также отмечается меньшая площадь распространения загрязнения. Большие значения максимума площади загрязнения и времени ее рассеяния наблюдаются в Таганрогском заливе.

**Заключение.** В работе представлены результаты численных экспериментов расчета сгонно-нагонных явлений и распространения пассивной примеси, вызванных воздействием переменного по времени и пространству 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. Выполнен анализ влияния изменения интенсивности атмосферных воздействий на максимальные значения отклонений уровня и скорости течений, а также на особенности трансформации примеси.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.А., Коновалов А.В., Черкесов Л.В. Влияние циклонов на изменение уровня поверхности Азовского и Черного морей // Метеорология и гидрология. – 2003. – № 4. – С. 73-80.
2. 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: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2010. – 178 с.
3. 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.
4. Weather and Wave Forecast for Greece, Europe – Mediterranean Sea. Сайт «National & Kapodistrian University of Athens». [Электронный ресурс]. <http://forecast.uoa.gr> (Последнее обращение 01.11.2011).
5. Фомин В.В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ. – 2002. – вып. 249. – С. 246-255.
6. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model // Three-Dimensional Coastal Ocean Models (Ed. N. Heaps). – Washington, D. C.: American Geophysical Union. – 1987. – vol. 4. – P. 208.
7. Smagorinsky J. General circulation experiments with primitive equations. I. The basic experiment // Mon. Wea. Rev. – 1963. – vol. 91, № 2. – P. 99-164.
8. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. – 1982. – vol. 20, № 4. – P. 851-875.
9. Hsu S.A. A mechanism for the increase of wind stress coefficient with wind speed over water surface: A parametric model // Ibid. – 1986. – vol. 16. – P. 144-150.
10. Courant R., Friedrichs K.O., Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics // IBM J. – 1967, March. – P. 215-234.
11. Годунов С. К., Рябенский В. С. Разностные схемы. – М.: Наука. – 1977. – 440 с.
12. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море // СПб.: Гидрометеиздат, 1991. – 234 с.

13. *Лоция* Азовского моря. [Электронный ресурс] <http://www.katamaran.ru/maps/azov/4.htm> (Последнее обращение 10.11.2011).
14. *Матишов Г.Г.* Закономерности экосистемных процессов в Азовском море. – М.: Наука, 2006. – 304 с.

Материал поступил в редакцию 14.11.2011 г.

*АНОТАЦІЯ* З використанням прогностичних полів приводного вітру та атмосферного тиску на підставі тривимірної нелінійної моделі виконано аналіз згинно-нагінних явищ в Азовському морі. Проведено порівняння результатів чисельних експериментів і даних спостережень рівня моря на гідрометеорологічних станціях. Досліджений вплив зміни інтенсивності атмосферних збуджень на максимальні величини відхилень рівня та швидкості течій, а також на особливості розповсюдження домішки. Аналіз результатів моделювання дозволив зробити висновки про залежність часу розсіювання домішки від швидкості вітру та розташування районів забруднень.

*ABSTRACT* By using of prognostic fields of near water wind and atmospheric pressure the analyses of surges in the Sea of Azov are carried out on the basis of three-dimensional nonlinear model. Comparison of the results of numeric calculations and the data of direct measurements of sea level on the number of coastal stations are made. Effect of intensity of atmospheric impact on maximum values of level deviations, current velocities and admixture transformation features is studied. Analysis of results of numeric calculations allowed to make a conclusion about dependences of pollution dissipation time on wind velocity and location of pollution areas.