

*Л. В. Черкесов, Т. Я. Шульга*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАННЕЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ  
ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ  
В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ АЗОВСКОГО МОРЯ**

*L. V. Cherkesov, T. Ya. Shul'ga*

**SIMULATION AND EARLY WARNING OF NATURAL  
AND TECHNOGENIC INFLUENCES IN COASTAL AREAS  
IN THE SEA OF AZOV**

В данной работе на основе применения нелинейной трехмерной сигма-координатной модели исследуются волны и течения в Азовском море, вызываемые действием атмосферных полей, полученных по данным системы прогноза SKIRON при наличии стационарных течений. Выполнен анализ физических закономерностей распространения пассивной примеси в Азовском море с учетом ветровых воздействий различной интенсивности и стационарных течений. Установлено, что удвоение интенсивности стационарного ветра при действии с одним и тем же нестационарным ветром приводит к увеличению максимумов скоростей нестационарных течений на 64 %. Двукратное увеличение или уменьшение интенсивности полей приводного ветра без учета стационарных течений вызывает течения, скорости которых отличаются не более, чем на 25 % по сравнению со скоростями, вызванными действием данных ветровых полей SKIRON.

**Ключевые слова:** *сигма-координатная модель, динамические процессы, сгонно-нагонные процессы, стационарные течения, пассивная примесь, приводный ветер.*

In this work, the waves and currents generated by prognostic wind in the Sea of Azov are investigated using a three-dimensional nonlinear sigma-coordinate model. The mathematical model was also used for studying the transformation of passive admixture in the Sea of Azov, caused by the spatiotemporal variations in the fields of wind and atmospheric pressure, obtained from the prediction SKIRON model. Comparison of the results of numerical calculations and the data of field observations, obtained during the action of the wind on a number of hydrological stations was carried out. The evolutions of storm surges, velocities of currents and the characteristics of the pollution region at different levels of intensity of prognostic wind and stationary currents were found. The results of a comprehensive study allow reliably estimate modern ecological condition of offshore zones, develop predictive models of catastrophic water events and make science-based solutions to minimize the possible damage.

**Keywords:** *mathematical modeling, Sea of Azov, storm, surge phenomena processes, surface currents, evolution of passive admixture, three-dimensional hydrodynamic model.*

**Введение**

Изменения уровня, являющиеся следствием сгонно-нагонных явлений и сопровождающиеся при сгонах — обмелением фарватеров, при нагонах — затоплением островов, берегов, разрушением портовых сооружений, имеют место, как правило,

на участках у берегов с пологими подводными склонами, в заливах, узких проливах (оз. Донузлав, заливы Таганрогский, Финский, Обская губа и др.). Фактические величины сгонно-нагонных колебаний уровня Азовского моря бывают очень значительными, что приводит к возникновению опасных и катастрофических последствий. Для одного из наиболее изученных бассейнов — Азовского моря, — где имеется сеть морских береговых станций и постов для анализа величин сгонов и нагонов, недостаточно проведения только стандартных специализированных экспедиционных исследований. Наиболее обоснованное представление о гидрометеорологических процессах возможно вследствие анализа расчетов, базирующихся на применении современных трехмерных численных моделей. Они позволяют учитывать реальные атмосферные воздействия, рельеф дна, конфигурацию береговой линии.

Исследование течений и колебаний уровня, возникающих в этом море под действием переменных во времени ветра и атмосферного давления при отсутствии стационарных течений проведено в статьях [1, 2]. В этих работах для изучения динамических процессов в Азовском море применяется трехмерная нелинейная  $\sigma$ -координатная модель, которая основывается на нелинейных уравнениях движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении гидростатики. При построении численного алгоритма в этой модели используется криволинейная система координат [3–5].

В данной работе указанная выше математическая модель применена для исследования сгонно-нагонных явлений, течений и трансформации пассивной примеси в Азовском море, возникающих под действием переменных по пространству и времени полей приводного ветра и атмосферного давления по метеорологическим данным прогностической системы *SKIRON* [6] (<http://forecast.uoa.gr>). Выполнено сравнение результатов проведенных численных расчетов с данными натурных наблюдений, полученными во время действия этого ветра на ряде гидрологических станций. Найдены зависимости величин сгонов и нагонов, скоростей течений и характеристик эволюции областей загрязнения на различных горизонтах от интенсивности прогностического ветра и стационарных течений.

### Постановка задачи. Граничные и начальные условия

Введем систему координат, в которой ось  $x$  направлена на восток,  $y$  — на север,  $z$  — вертикально вверх. Математическая модель основывается на уравнениях движения и неразрывности, записанных в декартовой системе координат  $(x, y, z)$  с использованием приближений Буссинеска и гидростатики [3, 7, 8]:

$$\frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( 2A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ A_M \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( 2A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_M \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (2)$$

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

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

Здесь  $u, v, w$  — проекции скорости по осям  $x, y, z$  соответственно;  $t$  — время;  $d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x + v\partial/\partial y + w\partial/\partial z$  — полная производная;  $p$  — давление;  $\rho$  — плотность;  $g$  — ускорение свободного падения;  $f$  — параметр Кориолиса;  $A_M$  — коэффициент горизонтальной турбулентной вязкости, вычисляемый по формуле Смагоринского [9];  $K_M$  — коэффициент вертикальной турбулентной вязкости, для определения которого используется теория Меллора–Ямады [10].

Коэффициент горизонтальной вязкости  $A_M$  вычисляется с использованием модели подсеточной вязкости Смагоринского [13] в зависимости от горизонтальных градиентов скорости. Соотношения для расчета коэффициентов вертикальной вязкости  $K_M$  и турбулентной диффузии  $K_H$  в соответствии с полуэмпирической моделью Меллора–Ямады уровня 2.5 [10] имеют вид:

$$K_M = qlS_M, \quad K_H = qlS_H, \quad (5)$$

где  $S_M$  и  $S_H$  в нейтрально стратифицированном потоке равны, соответственно, 0,30 и 0,49. Данная параметризация основана на решении двух дополнительных уравнений в частных производных для определения кинетической энергии турбулентности ( $q^2/2$ ) и макромасштаба турбулентности ( $l$ ).

Граничные условия на свободной поверхности ( $z = \zeta(x, y)$ ) имеют вид

$$w|_{z=\zeta} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}, \quad K_M \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=\zeta} = (\tau_{0x}, \tau_{0y}). \quad (6)$$

При этом  $\tau_{0x} = C_a W_x |\mathbf{W}|$  и  $\tau_{0y} = C_a W_y |\mathbf{W}|$  — проекции касательных напряжений ветра [8];  $\mathbf{W} = (W_x, W_y)$  — вектор скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря;  $C_a$  — эмпирический коэффициент поверхностного трения [14], который варьируется в зависимости от величины скорости ветра.

$$10^3 C_a = \begin{cases} 2,5; & |\mathbf{W}| > 22 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \\ 0,49 + 0,065|\mathbf{W}|; & 8 \leq |\mathbf{W}| \leq 22 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \\ 1,2; & 4 \leq |\mathbf{W}| \leq 8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \\ 1,1; & 1 \leq |\mathbf{W}| \leq 4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \\ 0,6; & |\mathbf{W}| \leq 1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}. \end{cases} \quad (7)$$

На дне ( $z = -H(x, y)$ ) равна нулю нормальная составляющая скорости [8]. Придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [3]

$$\left( w + u \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial H}{\partial y} \right) \Big|_{z=-H} = 0, \quad K_M \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) \Big|_{z=-H} = (\tau_{1x}, \tau_{1y}), \quad (8)$$

здесь  $\tau_{1x} = c_b u \sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $\tau_{1y} = c_b v \sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $c_b$  — коэффициент донного трения, который находится по формуле  $c_b = \max \left[ k^2 \left( \ln \frac{H + z_b}{z_0} \right)^{-2}; 0,0025 \right]$ , где  $z_b$  — параметр шероховатости, характеризующий гидродинамические свойства подстилающей донной поверхности. На боковых границах выполняются условия прилипания.

В качестве начальных условий принимаем отсутствие движения жидкости и колебаний свободной поверхности до начала действия атмосферных возмущений ( $t = 0$ ):

$$u(x, y, z, 0) = 0, \quad v(x, y, z, 0) = 0, \quad w(x, y, z, 0) = 0, \quad \zeta(x, y, z, 0) = 0. \quad (9)$$

Для расчета распространения примеси концентрации  $C(x, y, z, t)$  используем уравнение переноса и диффузии  $C(x, y, z, t)$  [8]:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right). \quad (10)$$

Здесь  $A_H = 10 \text{ м}^2/\text{с}$  [3, 5] — коэффициент горизонтальной и  $K_H$  — вертикальной турбулентной диффузии, при этом  $K_H$  рассчитывается по формуле (2). На свободной поверхности и в придонном слое к динамическим граничным условиям добавляются условия отсутствия потоков примеси через свободную поверхность, боковые стенки ( $S$ ) и дно бассейна [8]:

$$\left( K_H \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} \right) \Big|_{z=\zeta} = 0, \quad \left( A_H \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} \right) \Big|_S = 0, \quad \left( K_H \frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} \right) \Big|_{z=-H} = 0. \quad (11)$$

Начальная область загрязнения для всех рассматриваемых далее видов атмосферных возмущений расположена в поверхностном слое:

$$C_0(x, y, z) = \begin{cases} 1, & r \leq R, 0 \geq z \geq -z_1, \\ 0, & r > R, z < 0; r \leq R, z < -z_1, \end{cases} \quad (12)$$

где  $z_1$  — толщина слоя области загрязнения;  $R$  — ее радиус;  $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$  — расстояние от центра этой области ( $x_0, y_0$ ) до точки, в которой вычисляется концентрация. В качестве параметров, характеризующих эволюцию пассивной примеси, выбраны: время рассеивания примеси ( $t_d$ ) и коэффициент максимальной площади ее распространения на различных горизонтах ( $K_{\max}$ ). При этом  $K_{\max} = S_{\max}/S_0$ , где  $S_0$  — площадь области начального загрязнения в поверхностном слое;  $S_{\max}$  — наибольшее значение площади загрязнения на рассматриваемом горизонте в процессе трансформации примеси. Условием полного рассеивания загрязнения принимается величина концентрации, не превышающая  $2,5 \times 10^{-2}$  во всей акватории моря ( $C_d = 2,5 \times 10^{-2}$ ).

Для численной реализации выполняется переход от координаты  $z$  к сигма-координате [3, 5, 8]. В этом случае алгоритм решения базируется на применении двухслойных разностных схем. Операторы переноса аппроксимируются [11] с помощью *TVD*-схемы (линейная комбинация схемы направленных разностей и схемы Лакса–Вендроффа), пространственная дискретизация уравнений выполняется на *C*-сетке. Используются равномерные шаги по горизонтальным координатам  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и по  $\sigma$ -координате.

Разрешение модели по широте и долготе составляет  $(1/59)^\circ \times (1/84)^\circ$ , при котором линейные размеры ячейки  $\Delta x = \Delta y = 1,4$  км, количество узлов горизонтальной сетки равно  $276 \times 176$ . Число расчетных уровней  $\sigma$  по вертикали — 11. Уравнения интегрировались с шагом  $\Delta t = 18$  с для определения осредненных двумерных компонент скорости и уровня моря и  $\Delta t_A = 10\Delta t = 3$  мин — для вычисления отклонений от найденных средних и вертикальной компоненты скорости. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости для баротропных волн [9].

Топография дна на модельную сетку интерполирована с использованием массива глубин, приведенного в навигационных картах. Отклонения уровня Азовского моря анализируются на девяти станциях, расположенных вблизи крупных населенных пунктов (рис. 1).

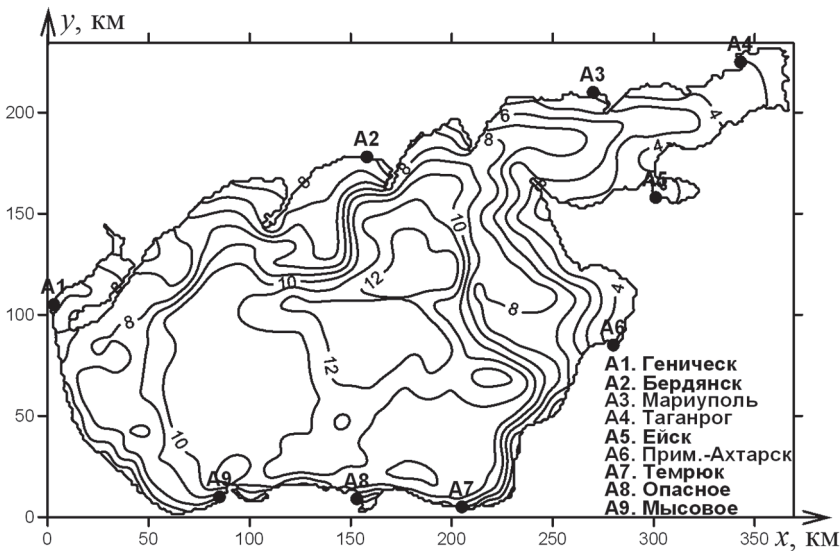


Рис. 1. Рельеф дна (м) Азовского моря и положение прибрежных станций

**Анализ результатов численных экспериментов**

Стационарные движения в Азовском море генерируются полем западного ветра, скорость которого ( $|\mathbf{W}|_{1,2}^{st} = 5, 10$  м/с) на поверхности моря не зависит от  $x$  и  $y$ , а по времени первые три часа ( $0 < t \leq 3$  ч) нарастает со временем по линейному закону ( $|\mathbf{W}|_{1,2}^{st} = 0$

при  $t = 0$ ), достигает наибольшего значения и далее ( $t \geq 3$  ч) не меняется. Момент выхода течений на установившийся режим ( $t = t_0$ ) определяется тем, что между двумя соседними значениями времени ( $t_k > t_0$  и  $t_k + \Delta t$ ) не происходит заметных изменений отклонений уровня и скоростей течений (изменения не превышают 3 %). Исходя из этого находим время установления движения жидкости ( $t = t_{01}, \mathbf{W}_1^{st}; t = t_{02}, \mathbf{W}_2^{st}$ ).

В момент установления движения жидкости ( $t = t_0$ ) к стационарному ветру ( $\mathbf{W}_{1,2}^{st}$ ) присоединяется неоднородное по пространству и времени поле ветра, полученное по данным ре-анализа ( $\mathbf{W}_{SKIRON}$ ). При  $t > t_0$   $\mathbf{W}_{1,2}^{st}$  поддерживает стационарное движение, а  $\mathbf{W}_{SKIRON}$  добавляет к нему нестационарную составляющую.

В серии численных экспериментов изучается влияние совместного действия стационарного ( $\mathbf{W}_{1,2}^{st}$ ) и переменного ( $\mathbf{W}_{SKIRON}$ ) ветра на максимальные скорости течений и экстремальные значения сгонов и нагонов. Эти результаты сравниваются с данными, полученными при расчете волн и течений, вызванных действием только постоянного ветра или только ветра, определенного по данным ре-анализа.

Исследование установившихся течений выполняется для постоянного западного ветра, скорость которого равна 5 и 10 м/с. В качестве переменного по времени и неоднородного по пространству используются поля приводного ветра модели SKIRON [15] за период с 8 по 18 сентября 2007 г. Его действие при наличии стационарных течений в Азовском море происходит в течение десяти суток, начиная с 0 ч 8 сентября.

В табл. 1 представлены как функции времени величины максимальных скоростей и направлений ветра ( $\mathbf{W}_{SKIRON}$ ) над Азовским морем с 11 по 18 сентября 2007 г. При этом между двумя соседними значениями времени его скорость меняется монотонно. Отклонения вектора скорости ветра от направления оси  $x$  (ось  $x$  направлена на восток под углом  $50^\circ$  к параллели) указаны в градусах. Отсюда видно, что за указанный период (192 ч) наибольшее и наименьшее значения максимальной скорости равны 12,7 и 1,6 м/с соответственно. Преобладающими направлениями ветра являются северо-восточное и северо-западное. Отметим, что результаты многолетних наблюдений атмосферных возмущений в районе Азовского моря [1] для указанного периода (сентябрь) удовлетворительно согласуются с данными модели SKIRON, приведенными в этой таблице.

Таблица 1 (начало)

**Максимальные скорости ветра как функции времени, полученные по данным модели SKIRON с нуля часов 11 сентября до 24 часов 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                     |

| Время, ч | Скорость ветра, м/с | Направление ветра, град | Время, ч | Скорость ветра, м/с | Направление ветра, град |
|----------|---------------------|-------------------------|----------|---------------------|-------------------------|
| 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                     | 152      | 4,9                 | 106                     |
| 62       | 11,6                | 350                     | 192      | 5,8                 | 200                     |

На рис. 2 представлены векторные поля ветра модели SKIRON над Азовским морем, которые соответствуют экстремальным значениям его скорости или резким переменам направления. Первая экстремальная ситуация возникает через 36 ч (рис. 2, а).

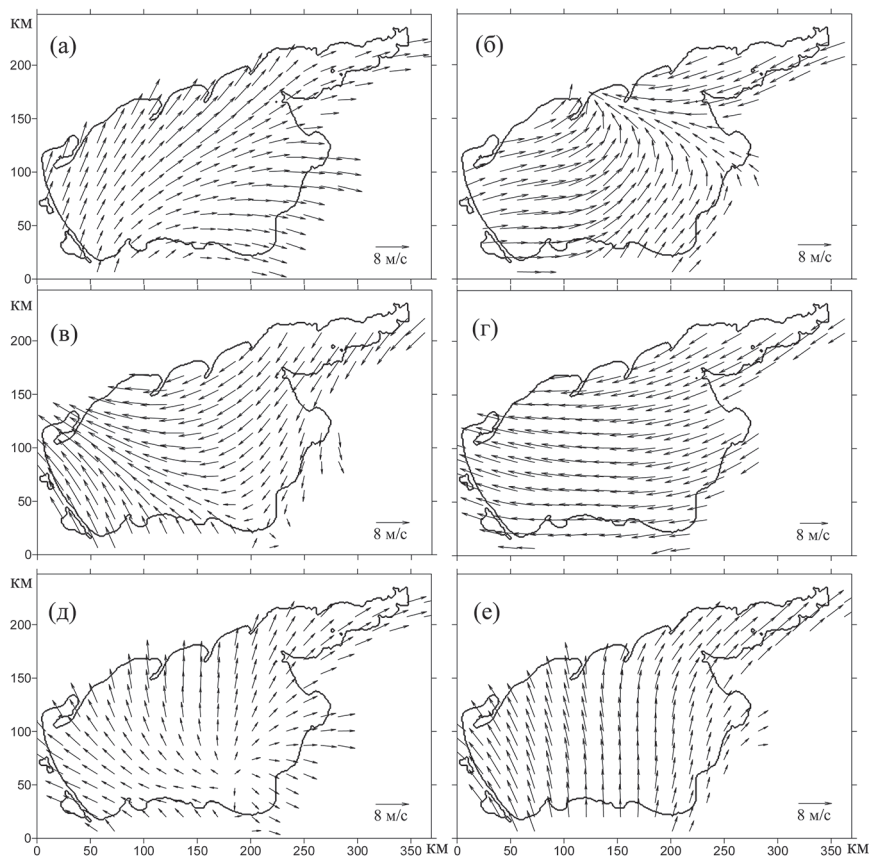


Рис. 2. Поля ветра, полученные поданным ре-анализа модели SKIRON, в различные моменты времени от 0 ч 11.09.2007: а — 36 ч; б — 68 ч; в — 90 ч; г — 140 ч; д — 152 ч; е — 168 ч

В этом случае над южной частью моря отмечается антициклоническое воздействие, а в его северной части скорость ветра достигает на отдельных участках 10 м/с. Через 68 ч ( $t = t_0 + 68$  ч) со скоростью 15...20 м/с перемещаются два небольших циклона (см. рис. 2, б), которые формируются в восточной и западной частях моря. Следующие максимумы скоростей течений, которые соответствуют обширным циклоническим образованиям (см. рис. 2, в, г), достигаются в 90 и 140 ч. На рис. 2, д, е показаны направления полей ветра в 152 и 168 ч, соответствующие экстремумам его скорости. В дальнейшем (до 18 сентября) интенсивность ветра уменьшается.

В табл. 2 даны максимальные величины ( $|U|_{\max}$ ) скоростей стационарных течений, вызванных постоянным ветром  $W_{1,2}^{st}$ , а также наибольшие значения скоростей нестационарных течений, генерируемых только ветром  $W_{SKIRON}$  и их совместным действием  $W_{1,2}^{st} + W_{SKIRON}$ . Здесь же указаны координаты максимальных величин скоростей и время их достижения на различных глубинах. Из анализа этих данных следует, что при наличии стационарных течений увеличиваются скорости нестационарных течений по сравнению с их величинами при действии только ветра  $W_{SKIRON}$ .

Таблица 2

**Максимальные значения скоростей течений (м/с)  
на различных глубинах Азовского моря, время их достижения ( $t_{\max}$ , ч.мин)  
и соответствующие им координаты ( $x_{\max}$ ,  $y_{\max}$ )**

| Действующий ветер       | Горизонт, м | $ U _{\max}$ , м/с | $x_{\max}$ , км | $y_{\max}$ , км | $t_{\max}$ , (ч.мин) |
|-------------------------|-------------|--------------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| $W_1^{st}$              | 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                 |
| $W_2^{st}$              | 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          | 9.16                 |
| $W_{SKIRON}$            | 10          | 0,29               | 235,99          | 171,16          | 9.54                 |
|                         | 1           | 0,48               | 206,25          | 189,27          | 128.15               |
|                         | 3           | 0,46               | 241,76          | 188,88          | 130.10               |
| $W_{SKIRON}$            | 5           | 0,41               | 263,30          | 199,05          | 137.20               |
|                         | 10          | 0,35               | 238,20          | 175,76          | 145.15               |
|                         | 1           | 0,73               | 201,48          | 106,15          | 130.20               |
| $W_1^{st} + W_{SKIRON}$ | 3           | 0,69               | 224,73          | 176,44          | 135.10               |
|                         | 5           | 0,61               | 225,31          | 156,78          | 139.15               |
|                         | 10          | 0,45               | 174,86          | 160,92          | 147.20               |
| $W_2^{st} + W_{SKIRON}$ | 1           | 0,91               | 159,09          | 175,58          | 152.10               |
|                         | 3           | 0,85               | 199,38          | 159,67          | 154.15               |
|                         | 5           | 0,72               | 258,19          | 188,40          | 157.10               |
|                         | 10          | 0,65               | 209,66          | 146,44          | 162.20               |



Так, в случае  $W_1^{st} + W_{SKIRON}$  значения  $|U|_{max}$  в 1,52; 1,50; 1,48 и 1,28 раз больше, чем для  $W_{SKIRON}$  на глубинах 1; 3; 5 и 10 м соответственно. Аналогично при  $W_2^{st} + W_{SKIRON}$  величины  $|U|_{max}$  в 1,25; 1,23; 1,18 и 1,44 раз больше, чем для  $W_1^{st} + W_{SKIRON}$  на этих же уровнях. При этом для всех скоростей ветра  $|U|_{max}$  монотонно убывают с ростом глубины и на каждой из них для  $W_2^{st}$  и  $W_{SKIRON}$  отличаются не более, чем на 5 %.

В табл. 3 приведены максимумы возвышений ( $\zeta_{max}$ ) и понижений ( $|\zeta|_{max}$ ) уровня, координаты ( $x_{max}$ ,  $y_{max}$ ) и время их достижения ( $t_{max}$ ) в открытой части моря для  $W_{1,2}^{st}$ , а также при  $W_{SKIRON}$  и  $W_{1,2}^{st} + W_{SKIRON}$ . Анализ данных, приведенных в этой таблице, свидетельствует о том, что для  $W_2^{st}$  величины  $\zeta_{max}$  и  $|\zeta|_{max}$  в 3,45 и 3,9 раз больше, чем при  $W_1^{st}$ . В случае  $W_{SKIRON}$  значения  $\zeta_{max}$  и  $|\zeta|_{max}$  в 2,15 и 2,5 раза больше, чем для  $W_1^{st}$ , и в 1,6 и 1,5 раза меньше, чем при  $W_2^{st}$ . Для  $W_2^{st} + W_{SKIRON}$ , величина  $\zeta_{max}$  в 1,31, а  $|\zeta|_{max}$  — в 2,1 раза больше, чем в случае  $W_1^{st} + W_{SKIRON}$ . Таким образом, действие стационарного ветра одного направления, но большей скорости (5 и 10 м/с), при наличии  $W_{SKIRON}$  вызывает возрастание максимумов отклонений уровня ( $\zeta_{max}$  и  $|\zeta|_{max}$ ) на 31 % и 80 % соответственно.

Таблица 3

**Максимальные значения отклонений уровня моря ( $\zeta_{max}$  и  $|\zeta|_{max}$ , м), время их достижения (ч.мин) и соответствующие им координаты (км)**

| Действующий ветер       | $\zeta_{max}$ , м | $x_{max}$ , км | $y_{max}$ , км | $t_{max}$ , ч.мин | $ \zeta _{max}$ , м | $x_{min}$ , км | $y_{min}$ , км | $t_{min}$ , ч.мин |
|-------------------------|-------------------|----------------|----------------|-------------------|---------------------|----------------|----------------|-------------------|
| $W_1^{st}$              | 0,20              | 366,51         | 219,61         | 17.10             | 0,10                | 4,02           | 95,07          | 13.23             |
| $W_2^{st}$              | 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            |
| $W_1^{st} + W_{SKIRON}$ | 0,55              | 296,14         | 100,05         | 171.11            | 0,39                | 22,34          | 124,14         | 191.30            |
| $W_2^{st} + W_{SKIRON}$ | 0,72              | 290,20         | 101,10         | 172.20            | 0,58                | 21,25          | 124,00         | 192.45            |

Изменения профиля поверхности моря, вызванные действием ветра, показаны на рис. 3. Отсюда видно, что в установившемся режиме (рис. 3, а) имеет место понижение уровня вдоль западного побережья и повышение — вдоль восточного. Узловая (штриховая) линия пересекает центральную часть моря перпендикулярно скорости ветра. В процессе действия переменного ветра (рис. 3, б–г) районы достижения наибольших и наименьших значений отклонений уровня моря меняются.

В табл. 4 даны величины максимальных отклонений уровня на береговых станциях Азовского моря, вызванных стационарным ветром ( $W_{1,2}^{st}$ ), только ветром по данным ре-анализа ( $W_{SKIRON}$ ) и их совместным действием ( $W_{1,2}^{st} + W_{SKIRON}$ ). В верхней части таблицы приведены значения нагонов, в нижней — сгонов. Из анализа представленных результатов расчетов следует, что наибольшие нагоны, генерируемые системой стационарного и переменного ветров ( $W_{1,2}^{st} + W_{SKIRON}$ ), имеют место на станциях: Таганрог — 20,7 см ( $W_1^{st}$ ), 62,4 см ( $W_2^{st}$ ); Приморско-Ахтарск — 57,1 см ( $W_{SKIRON}$ ), 80,4 см ( $W_1^{st} + W_{SKIRON}$ ); Ейск — 102,2 см ( $W_1^{st} + W_{SKIRON}$ ). Отсюда видно, что максимум нагона в случае  $W_2^{st} + W_{SKIRON}$  (102,2 см) в 1,27 раза больше, чем для  $W_1^{st} + W_{SKIRON}$  (80,4 см). Минимальные нагоны возникают в Мысовом — 7,5 см ( $W_1^{st}$ ), 13,9 см ( $W_2^{st}$ ); в Опасном — 9,4 см ( $W_{SKIRON}$ ), 16,1 см ( $W_1^{st} + W_{SKIRON}$ ) и 24,8 см ( $W_2^{st} + W_{SKIRON}$ ).

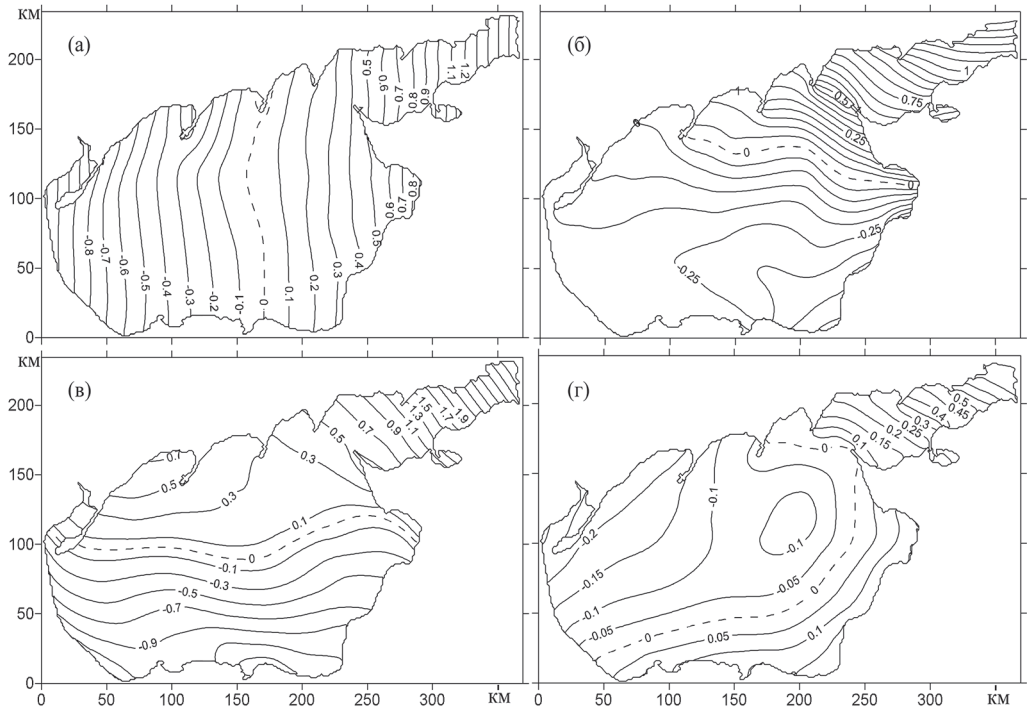


Рис. 3. Поля уровня Азовского моря в различные моменты времени:  
*a* — стационарный режим ( $W_1^{st}$ ,  $t = 48$  ч), нестационарный режим ( $W_1^{st} + W_{SKIRON}$ );  
*б* — 68 ч; *в* — 90 ч; *г* — 140 ч

При совместном действии переменного и постоянного ветра максимумы сгонов становятся больше, чем в установившемся режиме и в случае отсутствия стационарных течений. Для всех рассматриваемых видов ветра наибольшие сгоны имеют место в Геническе: 12,2 см ( $W_1^{st}$ ), 51,7 см ( $W_2^{st}$ ), 42,5 см ( $W_{SKIRON}$ ), 76,5 см ( $W_1^{st} + W_{SKIRON}$ ) и 87,0 см ( $W_2^{st} + W_{SKIRON}$ ). Наименьшие сгоны возникают в Опасном — 3,3 см ( $W_1^{st}$ ), 11,1 см ( $W_2^{st}$ ) и в Темрюке — 8,7 см ( $W_{SKIRON}$ ), 15,2 см ( $W_1^{st} + W_{SKIRON}$ ) и 23,0 см ( $W_2^{st} + W_{SKIRON}$ ).

Сравним результаты моделирования и данные натуральных измерений, приведенные в «Таблицах ежечасных значений высот уровня моря Государственной метеорологической службы Украины» за период с 8 по 18 сентября 2007 г. Оценим полученные численно экстремальные величины нагонов, вызванных ветром  $W_{SKIRON}$ , с ежечасными данными из указанных таблиц. В Геническе расчетный максимум нагона составляет 25,4 см, что на 4,7 см (16 %) меньше, чем по данным наблюдений. В Мариуполе найденное численно наибольшее значение нагона (29,3 см) на 4,0 см (12 %) меньше измеренного. Отсюда следует, что величины амплитуд колебаний уровня, полученные по натурным данным и путем численных расчетов, достаточно хорошо совпадают. Указанные отличия, по-видимому, вызваны определенными погрешностями при измерениях и математическом моделировании.

Таблица 4

**Максимальные нагоны и сгоны (см) на береговых станциях Азовского моря в стационарном режиме и вызванные прогностическим ветром при наличии стационарных течений**

| Береговые станции | $W_1^{st}$ | $W_2^{st}$ | $W_{SKIRON}$ | $W_1^{st} + W_{SKIRON}$ | $W_2^{st} + W_{SKIRON}$ |
|-------------------|------------|------------|--------------|-------------------------|-------------------------|
| 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                    | 24,8                    |
| 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          | 15,2                    | 23,0                    |
| Опасное           | 3,3        | 11,1       | 10,6         | 20,5                    | 34,2                    |
| Мысовое           | —          | —          | 22,3         | 39,4                    | 63,9                    |

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 центра области выброса примеси находится в точке с координатами  $x_0 = 180$  км,  $y_0 = 120$  км, где глубина моря равна 12 м. Область выброса примеси имеет вид цилиндра радиуса  $R = 9$  км и глубины  $h_1$  ( $0 \geq z \geq h_1$ ), где  $h_1$  (1 м) — шаг по вертикали в поверхностном слое. При этом начальное значение концентрации постоянно в данной области и равно единице ( $C_0(x, y, z) = 1$ ).

Время выброса загрязнения в различных экспериментах не одинаково и зависит от характеристик действующего ветра. В случае стационарного ветра моменты выброса загрязнения ( $t = t_{01}, W_1^{st}; t = t_{02}, W_2^{st}$ ) и установления движения жидкости ( $t = t_{11}, W_1^{st}; t = t_{12}, W_2^{st}$ ) совпадают:  $t_{01} = t_{11} = 38$  и  $t_{02} = t_{12} = 43$  ч. При наличии только ветра  $W_{SKIRON}$  момент времени выброса отвечает нулю часов 11 сентября 2007 г. ( $t_{03} = 72$  ч). Рассматривая совместное действие стационарного и нестационарного ветра, время выброса определяется так:  $t_{04} = t_{01} + t_{03}$  ( $W_1^{st} + W_{SKIRON}$ ) и  $t_{05} = t_{02} + t_{03}$  ( $W_2^{st} + W_{SKIRON}$ ). Для удобства анализа полученных результатов принимаем, что во всех случаях время выброса примеси равно нулю ( $t_0 = 0$ ).

В табл. 5 для трех горизонтов приведены значения коэффициента максимального распространения пассивной примеси ( $K_{max}$ ), время его достижения ( $t_{max}$ , ч) и время

полного рассеивания примеси ( $t_d$ , ч) для постоянного ветра ( $W_{1,2}^{st}$ ) и трех переменных ( $W_{SKIRON}$  и  $(W_{1,2}^{st} + W_{SKIRON})$ ). Из анализа приведенных данных видно, что максимум площади области загрязнения на каждом горизонте зависит от скорости ветра, приводящего к установившемуся движению.

Таблица 5

**Параметры ( $K_{max}$ ;  $t_{max}$ , ч;  $t_d$ , ч) эволюции распространения примеси на различных глубинах Азовского моря**

| Глубина, м     | Макс. значения ( $K$ , $t$ ) и $t_d$ | $W_1^{st}$ | $W_2^{st}$ | $W_{SKIRON}$ | $W_1^{st} + W_{SKIRON}$ | $W_2^{st} + W_{SKIRON}$ |
|----------------|--------------------------------------|------------|------------|--------------|-------------------------|-------------------------|
| $z = 0$        | $K_{max}$                            | 1,14       | 1,18       | 1,25         | 1,30                    | 1,32                    |
|                | $t_{max}$ , ч                        | 5,7        | 4,9        | 31           | 40                      | 40                      |
|                | $t_d$ , ч                            | 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                    |
|                | $t_{max}$ , ч                        | 14,3       | 14,7       | 34           | 42                      | 42                      |
|                | $t_d$ , ч                            | 36,7       | 37,6       | 104          | 106                     | 110                     |
| $z = -H + h_b$ | $K_{max}$                            | 1,16       | 1,19       | 1,33         | 1,37                    | 1,38                    |
|                | $t_{max}$ , ч                        | 26,9       | 25,5       | 55           | 58                      | 59                      |
|                | $t_d$ , ч                            | 53,4       | 55,2       | 108          | 110                     | 115                     |

В случае большей скорости постоянного ветра ( $W_2^{st} > W_1^{st}$ ) возрастают скорости течений (см. табл. 2), увеличивается площадь области распространения примеси ( $K_{max}$ ) и время ее полного рассеивания ( $t_d$ ). Совместное действие стационарного ветра и  $W_{SKIRON}$  вызывает рост области загрязнения.

В этом случае наибольшая площадь загрязнения имеет место для максимального значения скорости действующего ветра ( $W_2^{st} + W_{SKIRON}$ ). При этом на свободной поверхности  $K_{max}$  равен 1,32 через 40 ч после выброса примеси, а время ее полного рассеивания ( $t_d$ ) составляет 86,5 ч. Наибольшая величина площади области загрязнения на глубине  $z = -H/2$  достигается спустя 42 ч после выброса примеси ( $K_{max} = 1,35$ ), а полное рассеивание загрязнения происходит через 110 ч. В придонном слое ( $z = -H + h_b$ ) коэффициент максимального распространения примеси принимает значение 1,38 ( $t_{max} = 59$  ч). Отметим, что в рассматриваемом случае ( $W_2^{st} + W_{SKIRON}$ ) через 115 ч после выброса примеси ее концентрация во всей акватории моря не превышает 2,5 % от начального значения ( $C_d = 2,5 \times 10^{-2}$ ).

### Заключение

В работе представлены результаты исследования стонно-нагонных явлений и эволюции пассивной примеси системой течений, вызванных действием постоянного и переменного ветра в Азовском море. Достоверность этих результатов подтверждается сравнением рассчитанных значений экстремальных стонов и нагонов с данными натурных наблюдений, полученными во время действия приводного ветра по модели SKIRON на береговых гидрометеорологических станциях. Найденные при этом

результаты приведены в таблицах величин сгонов, нагонов и скоростей течений для различных характеристик постоянного и переменного ветра. Выполнен также анализ влияния скорости ветра и возникающих при этом течений на характеристики процесса трансформации пассивной примеси.

Анализ результатов моделирования динамических процессов в Азовском море позволил получить следующие выводы.

1. При исследовании стационарных движений установлено, что под действием постоянного ветра в 2 раза большей скорости (5 и 10 м/с) максимальные отклонения уровня моря увеличиваются в 3,45 раза (0,2 и 0,69 см) минимальные — в 3,9 раза (0,1 и 0,39 см); максимальные скорости установившихся течений возрастают в 12 раз (0,16 и 1,17 м/с).
2. Увеличение максимальной скорости ветра приводит к росту объема области загрязнения, наименьшая площадь загрязнения имеет место при отсутствии ветра.
3. Время достижения максимального объема области загрязнения уменьшается с увеличением скорости ветра.

### Литература

1. *Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР*. Т. III. Азовское море. — Л.: Гидрометеоздат, 1986. — 218 с.
2. *Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я.* Исследование сгонно-нагонных явлений в Азовском море, вызванных атмосферными возмущениями // *Доповіді Національної Академії наук України*. 2006. №11. — С. 109–113.
3. *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: Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2010. — 178 с.
4. *Сретенский Л.Н.* Теория волновых движений жидкости. — М.: Наука, 1977. — 815 с.
5. *Фомин В.В.* Численная модель циркуляции вод Азовского моря // *Науч. тр. УкрНИГМИ*. 2002. Вып. 249. — С. 246–255.
6. *Фомин В.В., Шульга Т.Я.* Исследование волн и течений, возникающих под действием ветра в Азовском море // *Доповіді Національної Академії наук України*. 2006. №12. — С. 110–115.
7. *Черкесов Л.В., Иванов В.А., Хартиев С.М.* Введение в гидродинамику и теорию волн. — СПб.: Гидрометеоздат, 1992. — 264 с.
8. *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. Vol. 4. — P. 1–16.
9. *Courant R., Friedrichs K.O., Lewy H.* On the partial difference equations of mathematical physics // *IBM J.* 1967. March. — P. 215–234.
10. *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.
11. *Pietrzak J.* The use of TVD limiters for forward-in-time upstream-biased advection schemes in ocean modeling // *Mon. Weather Rev.* 1998. Vol. 126. — P. 812–830.
12. *Rodi W.* Turbulence Models and Their Application in Hydraulics // *IAHR Monograph Series Balkema, The Netherlands*. 1993. — 116 p.
13. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment // *Mon. Weather Rev.* 1963. Vol. 91. — P. 99–164.
14. *Wannawong W., Humphries U.W., Wongwiset P., Yongvisessomjai S.* Mathematical Modeling of Storm Surge in Three Dimensional Primitive Equations // *International Journal of Computational and Mathematical Sciences*. 2011. № 5. — P. 44–53.
15. [Электронный ресурс]. — URL: <http://forecast.uoa.gr>