

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

## Изучение влияния параметров атмосферных возмущений на волны, течения и процесс трансформации загрязнения различных начальных размеров в Азовском море

*Представлены результаты исследования методом математического моделирования влияния на течения и волны в Азовском море однородных по пространству и времени ветров зональных направлений (северо-западного, западного и юго-западного). Выполнен анализ физических закономерностей распространения пассивной примеси в Азовском море различной начальной площади с учетом стационарных течений.*

В настоящее время наблюдается определенное несоответствие между уровнем знаний о гидродинамических процессах в прибрежно-шельфовой зоне Азовского моря и необходимостью эффективного прогнозирования возможных экологических изменений вследствие ее интенсивного экономического освоения, усиливающегося в последние годы. Имеются научные публикации [1–4], посвященные исследованию волнового режима для типичных полей ветра, характерных для этого региона. При изучении трансформации примеси генератором движения водной среды рассматривались постоянный ветер [1, 2] и усредненный на определенных промежутках времени [5].

В данном сообщении методом математического моделирования анализируется влияние однородных по пространству и времени характерных [6] для Азово-Черноморского региона ветров зональных направлений (северо-западного, западного и юго-западного) на течения, волны и трансформацию областей загрязнения различной начальной площади.

1. Введем прямоугольную систему координат, в которой ось  $x$  — направлена на восток,  $y$  — на север,  $z$  — вертикально вверх. Математическая модель основывается на уравнениях движения и неразрывности с использованием приближения гидростатики [7, 8]. При этом  $u, v, w$  — проекции скорости по осям  $x, y, z$ ;  $t$  — время;  $p$  — давление;  $\rho$  — плотность;  $g$  — ускорение свободного падения;  $f$  — параметр Кориолиса;  $\zeta(x, y, t)$  — профиль свободной поверхности.

Коэффициент горизонтальной вязкости  $A_M$  вычисляется с использованием модели подсеточной вязкости [9] в зависимости от горизонтальных градиентов скорости:

$$A_M = \frac{1}{2} C_M \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2}. \quad (1)$$

Соотношения для расчета коэффициентов вертикальной вязкости  $K_M$  и турбулентной диффузии  $K_H$  в соответствии с полуэмпирической моделью [10, 11] имеют вид:

$$K_M = qlS_M; \quad K_H = qlS_H. \quad (2)$$

Здесь  $C_M$ ,  $S_M$  и  $S_H$  — эмпирические константы. Данная параметризация основана на решении двух дополнительных уравнений в частных производных для определения кинетической энергии турбулентности ( $q^2/2$ ) и макромасштаба турбулентности ( $l$ ):

$$\frac{dq^2}{dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_q \frac{\partial q^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_q \frac{\partial q^2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) + 2 \left( P_S - \frac{q^3}{B_1 l} \right), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dq^2 l}{dt} = & \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_q \frac{\partial q^2 l}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_q \frac{\partial q^2 l}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon_q \frac{\partial q^2 l}{\partial z} \right) + l E_1 P_S + \\ & + l E_1 E_3 \frac{g}{\rho_0} \left( \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{1}{v_s^2} \right) - \frac{q^3}{B_1} \left( 1 + E_2 \left( \frac{l}{kL} \right) \right)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

При этом  $P_S = qlS_z \left( \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right)$  — скорость генерации турбулентности за счет вертикального сдвига скорости течения. Коэффициент  $S_z$  определяется по формуле

$$S_z = A_2 (1 - 6A_1/A_2) (1 - (3A_2 B_2 + 18A_1 A_2) G_H),$$

где  $G_H = -\frac{l^2}{q^2} \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}$ ;  $L = (\zeta - z)^{-1} + (H - z)^{-1}$ ;  $\epsilon_q = 0,2$ ;  $k = 0,4$  — постоянная Кармана;  $A_1 = 0,92$ ;  $A_2 = 0,74$ ;  $B_1 = 16,6$ ;  $B_2 = 10,1$ ;  $C_1 = 0,08$ ;  $E_1 = 1,33$ ;  $E_2 = 0,025$  — эмпирические постоянные.

Для решения уравнений (3), (4) имеют место следующие граничные условия:

$$q^2|_{z=\zeta} = B_1^{2/3} u_0^2, \quad l|_{z=\zeta} = 0; \quad q^2|_{z=-H} = B_1^{2/3} u_b^2, \quad l|_{z=-H} = 0; \quad (5)$$

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

В этом случае  $u_0$  и  $u_b$  — скорости в поверхностном и придонном слоях соответственно;  $\tau_{0x} = C_a W_x |\mathbf{W}|$  и  $\tau_{0y} = C_a W_y |\mathbf{W}|$  — проекции касательных напряжений скорости ветра ( $\mathbf{W}$ ) на высоте 10 м над уровнем моря [7];  $C_a$  — эмпирический коэффициент поверхностного трения [12], который зависит от скорости ветра:

$$10^3 C_a = \begin{cases} 2,5, & |\mathbf{W}| > 22 \text{ м/с}, \\ (0,49 + 0,0065|\mathbf{W}|), & 8 \leq |\mathbf{W}| \leq 22 \text{ м/с}, \\ 1,2, & 4 \leq |\mathbf{W}| \leq 8 \text{ м/с}, \\ 1,1, & 1 \leq |\mathbf{W}| \leq 4 \text{ м/с}. \end{cases} \quad (7)$$

На дне ( $z = -H(x, y)$ ) равна нулю нормальная составляющая скорости жидкости, придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [7]:

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

Здесь  $\tau_{1x} = C_b u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}$  и  $\tau_{1y} = C_b v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}$  (где  $C_b$  — коэффициент донного трения, который вычисляется по формуле  $C_b = k^2 / \ln^2(h_b/z_0)$  ( $h_b$  — шаг по вертикали в придонном

слое,  $z_0 = 0,003$  м — параметр шероховатости донной поверхности)). На боковых границах выполняются условия прилипания. В качестве начальных ( $t = 0$ ) принимаются условия отсутствия движения жидкости и колебаний свободной поверхности до включения атмосферных возмущений.

Для расчета распространения примеси концентрации  $C(x, y, z, t)$  используется уравнение переноса и диффузии, при этом на свободной поверхности и в придонном слое к динамическим граничным условиям добавляются условия отсутствия потоков примеси через свободную поверхность, боковые стенки и дно бассейна [7].

Начальная область загрязнения для всех рассматриваемых далее видов атмосферных возмущений в момент установления движения жидкости ( $t_0 = 48$  ч) расположена в поверхностном слое:

$$C(x, y, z, t_0) = \begin{cases} 1, & r \leq R, & 0 \geq z \geq -z_1, \\ 0, & r > R, & z \leq 0; & r \leq R, & z < -z_1, \end{cases} \quad (9)$$

где  $C(x, y, z, t)$  — концентрация загрязнения;  $r$  — расстояние от центра начальной области загрязнения до точки, в которой вычисляется концентрация;  $R$  — ее радиус;  $z_1$  — толщина верхнего расчетного слоя.

В качестве параметров, характеризующих эволюцию пассивной примеси, выбраны: время рассеивания загрязнения ( $t_d$ ), 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  $2,5 \cdot 10^{-2}$  во всей акватории моря.

Для численной реализации выполняется переход от координаты  $z$  к сигма-координате [1, 7, 13]. В этом случае алгоритм решения базируется на применении двухслойных разностных схем. Используются равномерные шаги по горизонтальным координатам  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и по координате  $\sigma$ . Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости для баротропных волн [14]. Топография дна на модельную сетку интерполирована с использованием массива глубин, приведенного в навигационных картах. Отклонения уровня моря анализируются на девяти станциях, расположенных вблизи крупных населенных пунктов.

**2.** В первой серии численных экспериментов исследуется влияние различных направлений и скоростей постоянного ветра на сгонно-нагонные процессы и течения, возникающие в море. Вследствие относительно симметричной конфигурации берегов, весьма однородных глубин и небольших размеров моря, характеристики волн при различных направлениях ветра меняются незначительно. Над Азовским морем преобладают [6, 15] ветры зональных направлений (северо-западное, западное и юго-западное), которые в общей циркуляции атмосферы обуславливают обмен воздуха между различными широтами Земли.

Максимальные величины скоростей стационарных течений ( $U_{st}$ , м/с), вызванных постоянным ветром двух скоростей и трех характерных направлений, демонстрирует табл. 1. Здесь указаны координаты  $U_{st}$  и время их достижения на различных глубинах Азовского моря. Из анализа приведенных данных следует, что наибольшие скорости движения жидкости в море достигаются при северо-западном ветре, а наименьшие — при западном. Так, в случае действия ветра наибольшей из рассматриваемых скоростей (15 м/с) величины  $U_{st}$  при северо-западном ветре больше, чем при западном в 1,18, 1,17, 1,15 и 1,19 раз на

глубинах 1, 3, 5 и 10 м соответственно. Превышение скоростей течений, возникающих при северо-западном ветре, составляет не более 16% относительно скоростей течений, вызванных западным ветром. При этом для данных скоростей и направлений ветра значения  $U_{st}$  убывают с ростом глубины на каждом из указанных интервалов не более чем на 5%.

Для рассматриваемых величин и трех направлений скоростей ветра в случае установившегося движения жидкости в табл. 2 представлены максимумы нагонов и сгонов на береговых станциях Азовского моря. Анализ приведенных здесь данных, свидетельствует о том, что ветер одного направления, но большей скорости, увеличивает предельные значения сгонов и нагонов на 31 и 80% для скоростей 5 и 15 м/с соответственно.

Ветры одной и той же величины скорости, но различных ее направлений (от юго-западного к северо-западному), могут приводить к изменению районов максимальных значений нагонов. Так, постоянные юго-западный и северо-западный ветры со скоростью 15 м/с вызывают наибольшие нагоны на ст. Таганрог (204 см) и Приморско-Ахтарск (102 см) соответственно.

В то же время под действием скоростей ветра (рассматриваемых величин и направлений) изменения районов максимальных сгонов не происходит. Во всех случаях наибольшие значения сгонов достигаются на ст. Геническ. При этом для ветра 15 м/с максимальная величина сгона (139 см) имеет место для западного направления. Отметим так же, что для одной и той же величины скорости, но разных направлений ветра, в одном и том же береговом районе могут быть и нагоны и сгоны. На ст. Мариуполь при 15 м/с возникают нагоны (119 и 88 см) для юго-западного и западного направлений и сгон (42 см) для северо-западного.

Из анализа изолиний, приведенных на рис. 1, следует, что для ветра 15 м/с всех трех направлений имеет место в каждом случае одна узловая линия в центральном районе моря, ориентированная перпендикулярно направлению действующего ветра. При этом к юго-западу от нее происходит увеличение уровня моря, к северо-западу — уменьшение. Как видно

Таблица 1

Горизонт, м	$W_{st}^1 = 5 \text{ м/с}$			$W_{st}^2 = 15 \text{ м/с}$		
	ю.-запад	запад	с.-запад	ю.-запад	запад	с.-запад
0	0,14	0,16	0,18	0,66	0,72	0,74
3	0,11	0,13	0,15	0,54	0,61	0,62
5	0,09	0,10	0,12	0,41	0,51	0,53
10	0,07	0,08	0,10	0,32	0,37	0,39

Таблица 2

Береговые станции	$W_{st}^1 = 5 \text{ м/с}$			$W_{st}^2 = 15 \text{ м/с}$		
	ю.-запад	запад	с.-запад	ю.-запад	запад	с.-запад
Геническ	-9	-12	-8	-96	-139	-101
Бердянск	3	-4	-6	46	-47	-78
Мариуполь	13	10	-4	119	88	-42
Таганрог	22	21	6	204	180	52
Ейск	13	14	6	117	123	63
Прим.-Ахтарск	7	10	9	86	117	102
Темрюк	-5	6	7	-41	73	89
Опасное	-6	4	5	-59	41	72
Мысовое	-8	-6	4	-92	-65	47

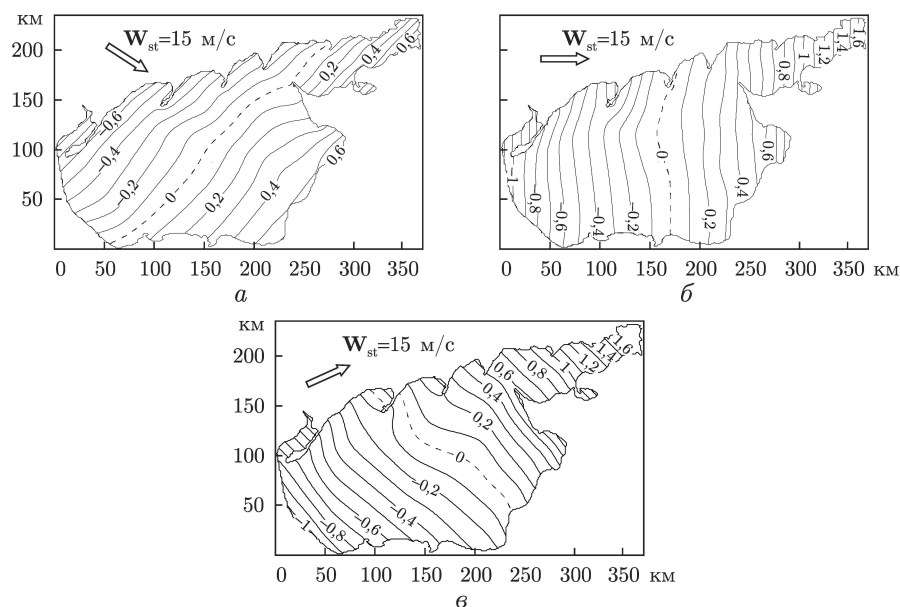


Рис. 1. Изолинии уровня ( $m$ ) Азовского моря, обусловленные действием постоянных ветров трех направлений со скоростью 15 м/с: юго-западного ( $a$ ), западного ( $b$ ) и северо-западного ( $v$ ) в случае установившихся движений жидкости

из рисунка, при северо-западном ветре область наименьших высот волн смещается в сторону юго-западной части моря ( $a$ ). При западном и юго-западном ветрах той же скорости ( $b$ ,  $v$ ) область наименьших высот волн (узловая линия) располагается над центральной частью моря с некоторым смещением к югу.

**3.** В следующей серии численных экспериментов поставим своей целью получить оценку влияния скорости и направления зональных ветров на трансформацию области загрязнения в центральном районе Азовского моря ( $A_0$ ). Известно [16], что основными источниками поступления загрязняющих веществ в морскую среду являются реки, ливневые стоки и сточные коллекторы бытовых вод вблизи больших городов. Часть из них действуют в режиме мгновенных сбросов (например, ливневые канализации).

Полагаем, что в момент их выброса ( $t_0 = 48$  ч) на поверхность моря центр области (12) находится в пункте  $A_0$  с координатами:  $x_0 = 110$  км,  $y_0 = 145$  км. Радиусы этих областей при  $t = t_0$  в рассматриваемых экспериментах принимаем равными 6,364, 9 и 12,728 км. При этом площадь каждой из них составляет  $S_0/2$ ,  $S_0$  и  $2S_0$  соответственно ( $S_0 = 254$  км<sup>2</sup>). Отметим, что при  $t \geq t_0$  скорости течений для всех характеристик ветра не зависят от времени.

Дальнейшее изменение концентрации загрязняющих веществ и занимаемой им области определяются в основном течениями, существенно зависящими от характеристик действующего ветра. В численных экспериментах для изучения механизмов переноса и трансформации загрязняющих веществ используются поля постоянного ветра трех направлений, указанных в п. 2.

В численном эксперименте с наименьшей начальной площадью загрязнения ( $S_0/2$ ) при скорости ветра 5 м/с максимум ее площади ( $K_{\max} = 1,23$ ) достигается в 5,11 ч; при 15 м/с (1,36) — в 4,15 ч. Отметим, что северо-западное направление ветра сильнее влияет на величину площади примеси и время ее рассеивания по сравнению с юго-восточным и западным направлениями. Так, для северо-западного ветра время ее полного рассеивания в поверх-

ностном слое увеличивается с ростом его скорости (5 и 15 м/с) и имеет место в 14,25 и 14,4 ч соответственно.

В этом же численном эксперименте ( $S_0/2$ ) для всех значений скорости ветра наибольшая площадь распространения загрязнения отмечается в случае северо-западного ветра и составляет 1,29 ( $\mathbf{W}_{st}^1$ ) и 1,46 ( $\mathbf{W}_{st}^2$ ). При этом растет и время ее достижения — 14,20 и 16,7 ч. Увеличивается также с ростом начальной площади загрязнения время его полного рассеивания. На “тихой воде” ( $\mathbf{W}_0 = 0$ )  $t_d$  принимает значения 45, 50 и 55 ч для  $S_0/2$ ,  $S_0$  и  $2S_0$  соответственно. При наличии атмосферных возмущений ( $\mathbf{W}_{st}^k$ ,  $k = 1, 2$ )  $t_d$  возрастает следующим образом: 53, 58 и 63 ч для  $S_0/2$  и  $S_0$ ,  $2S_0$  соответственно.

Выполним теперь сравнение времени рассеивания загрязняющих веществ ( $t_d$ ) и максимумов размеров занимаемых ими областей ( $K_{max}$ ) в зависимости от начальной площади ( $\gamma S_0$ ,  $\gamma = 1/2, 1, 2$ ). Анализ результатов численных экспериментов по выявлению закономерностей переноса и распространения примеси показал, что начальные размеры областей загрязнений мало влияют на характер их горизонтальных и вертикальных перемещений. Для оценки интенсивности трансформации примеси рассмотрен эксперимент с северо-западным ветром 15 м/с при дву- и четырехкратном увеличении начальной площади загрязнения. В этом случае в поверхностном слое моря  $K_{max}$  незначительно убывает (1,36, 1,27 и 1,18) с ростом начальной площади, в придонном слое  $K_{max}$  так же уменьшается (1,58, 1,41 и 1,26).

Исследуем влияние размеров начального загрязнения на продолжительность полного рассеивания загрязнений. Отсюда следует, что наибольшее значение  $t_d$  имеет место при юго-западном ветре 5 м/с. В этом случае в придонном слое ( $z = \tilde{H}_b$ ) с ростом начальных площадей значение  $t_d$  увеличивается на 11 и 25% и составляет: 49 ч для  $S_0/2$ ; 54,3 ч для ( $S_0$ ); 61,3 ч для ( $2S_0$ ).

Таким образом анализируя, приведенные результаты, пришли к следующему выводу: наибольшая площадь загрязнения по отношению к площади начального загрязнения увеличивается на 28% на “тихой воде” и на 58% при наличии рассматриваемых атмосферных возмущений.

1. *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: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – 178 с.
2. *Иванов В. А., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Атлас сгонно-нагонных процессов, волн и течений, вызываемых действием атмосферных возмущений в Азовском море. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. – 96 с.
3. *Доценко С. Ф., Иванов В. А.* Природные катастрофы Азово-Черноморского региона. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. – 174 с.
4. *Шульга Т. Я.* Течения и сгонно-нагонные процессы, вызываемые переменным по пространству и времени ветром в Азовском море // Доп. НАН України. – 2011. – № 2. – С. 121–124.
5. *Иванов В. А., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я.* Исследование влияния переменного по пространству и времени ветра на течения, сгонно-нагонные процессы и распространение примеси в Азовском море // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 8. – С. 69–79.
6. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 5. Азовское море: Справ. изд. Проект моря СССР.* – СПб.: Гидрометеиздат, 1991. – 234 с.
7. *Blumberg A. F., Mellor G. L.* A description of three dimensional coastal ocean circulation model in three-dimensional coast ocean models // Coastal and Estuarine Sci. – 1987. – 4. – P. 1–16.
8. *Черкесов Л. В., Иванов В. А., Хартиева С. М.* Введение в гидродинамику и теорию волн. – СПб: Гидрометеиздат, 1992. – 264 с.
9. *Smagorinsky J.* General circulation experiments with primitive equations. I. The basic experiment // Mon. Weather Rev. – 1963. – 91. – P. 99–164.

10. Mellor G. L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. – 1982. – 20, No 4. – P. 851–875.
11. Rodi W. Turbulence models and their application in hydraulics. – Balkema (The Netherlands): IAHR Monograph Series, 1993. – 116 p.
12. Wannawong W., Humphries U. W., Wongwiset P., Vongvisessomjai S. Mathematical modeling of storm surge in three dimensional primitive equations // Intern. J. Computat. and Mathemat. Sci. – 2011. – No 5. – P. 44–53.
13. Фомин В. В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря: Науч. тр. УкрНИГМИ. – Севастополь: Укр. н.-исслед. гидрометеоролог. ин-т, 2002. – Вып. 249. – С. 246–255.
14. Courant R., Friedrichs K. O., Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics // IBM J. – 1967. – 3. – P. 215–234.
15. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. – Ленинград: Гидрометеоздат, 1990. – Кн. 1, вып. 10. – 604 с.
16. Геоэкология шельфа и морских берегов морей России // Под ред. Н. А. Айбулатова. – Москва: Ноосфера, 2001. – 428 с.

*Морской гидрофизический институт  
НАН Украины, Севастополь*

*Поступило в редакцию 29.07.2013*

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

**Вивчення впливу параметрів атмосферних збурень на хвилі, течії та процес трансформації забруднювання різних початкових розмірів в Азовському морі**

*Представлено результати дослідження методом математичного моделювання впливу на течії та хвилі в Азовському морі однорідних за простором і часом вітрів зональних напрямів (північно-західного, західного і південно-західного). Виконаний аналіз фізичних закономірностей поширення пасивної домішки в Азовському морі різної початкової площі з урахуванням стаціонарних течій.*

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

**Study of the influence of parameters of atmospheric perturbations on waves, flows, and the process of transformation of a contamination of various initial sizes in the Sea of Azov**

*The results of simulation of the influence of winds of zonal directions (north-western, western, and south-western), which are homogeneous in space and time, on flows and waves in the Sea of Azov are presented. The analysis of the physical regularities of the propagation of a passive admixture of various initial areas in the Sea of Azov is executed with regard for the stationary flows.*