

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ЭВОЛЮЦИЮ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В АЗОВСКОМ МОРЕ

© 2017 г. **Л.В. Черкесов**, **Т.Я. Шульга**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Морской гидрофизический институт РАН» (299011, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2)

E-mail: tyshulga@mail.ru

Поступила в редакцию: 20.10.2016

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

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

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Черкесов Л.В., Шульга Т.Я. Исследование влияния стационарных течений на динамические процессы и эволюцию загрязнений в Азовском море // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2017. Т. 6, № 1. С. 56–72. DOI: 10.14529/cmse170104

Введение

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

Изучение течений и колебаний уровня, возникающих в Азовском море под действием переменного во времени ветра и атмосферного давления при отсутствии стационарных течений, проведено в [3, 4, 8]. На основе математического моделирования и данных наблюдений анализируется механизм формирования экстремальных течений и кратковременных наводнений, наблюдаемых часто в отдельных районах побережья Азовского моря, приводящих иногда к человеческим жертвам и материальному ущербу. Выделены районы побережья, в которых может действовать подобный механизм формирования наводнений и экстремальных течений [2, 5, 6]. Из современных публикаций по моделиро-

ванию циркуляции выделяются численные исследования, проведенные в [2, 10], в которых применялись трехмерные нелинейные модели мелкой воды для изучения стационарных движений и переноса примесей. С помощью двухслойной математической модели и по материалам ежедневных гидрометеорологических наблюдений на береговой базе Южного научного центра РАН в период с 20 марта по 26 марта 2013 года, проведено восстановление картины аномального затопления дельты Дона [2].

В настоящей работе с использованием трехмерной нелинейной сигма-координатной модели РОМ (*Princeton Ocean Model*) [11] проведен анализ, объединяющих четыре этапа исследований, посвященных изучению влияния интенсивности фоновых стационарных течений в Азовском море в условиях реально действующего нестационарного ветра. В рамках цикла численных экспериментов при наличии и отсутствии фоновых течений изучены сгонно-нагонные явления и течения в море, вызываемые действием ветра, приповерхностные поля которого получены по данным реанализа модели SKIRON [13]. В результате отдельного этапа исследований, определены зависимости размеров территорий возможных осушений и затоплений, от скорости действующего постоянного ветра, и геометрии побережья. Одной из основных частей решения задачи моделирования динамических процессов в Азовском море, явился этап сравнения результатов численных расчетов с данными натурных наблюдений, полученных во время действия прогностических полей, на ряде гидрологических станций. Анализ результатов заключительного цикла численных исследований позволяет сделать вывод о зависимости характеристик эволюции областей загрязнения на различных горизонтах Азовского моря от наличия прогностических полей и скоростей фоновых стационарных течений.

Статья организована следующим образом. В разделе 1 рассмотрено общее описание уравнений используемой в расчетах математической модели, переход к криволинейным координатам, дано обоснование ее параметров, выбранных с учетом различных физических факторов, объяснены особенности ее численной реализации. Раздел 2 содержит информацию о полях ветра и атмосферного давления, используемых в вычислительных экспериментах. В разделе 3 проводится обсуждение результатов расчетов моделирования динамических процессов в Азовском море, исследованию волн и течений, генерируемых неоднородными по времени и пространству полями ветра и атмосферного давления при наличии и отсутствии фоновых стационарных течений. В заключении подводятся итоги работы и формулируются направления дальнейших исследований.

1. Постановка задачи. Граничные и начальные условия

Поставим своей задачей исследовать движение жидкости, вызываемое атмосферными возмущениями, действующими на поверхность Азовского моря. Исходными уравнениями используемой математической модели является система, описывающая движение однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [7, 9, 11]. Введем систему координат, в которой ось x направлена на восток, y — на север, z — вертикально вверх

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

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

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

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

При этом u, v, w — проекции скорости по осям x, y, z ; t — время; g — ускорение свободного падения; f — параметр Кориолиса, $\zeta(x, y, t)$ — профиль свободной поверхности, $d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x + v\partial/\partial y + w\partial/\partial z$ — полная производная; $P(x, y, t) = P_{atm} + \rho g(\zeta - z)$ — давление, где $P_{atm} = 1013,25$ гПа — стандартное атмосферное давление при температуре 0° на широте 45° ; ρ — плотность воды, $\rho_0 = (\zeta + H)^{-1} \int_{-H}^{\zeta} \rho dz$ — средняя плотность воды по глубине. Параметризация коэффициентов вертикальной вязкости K_M и турбулентной диффузии K_H выполняются в соответствии с полуэмпирической дифференциальной моделью Меллора—Ямады [14]. Коэффициент горизонтальной вязкости A_M вычисляется с использованием модели подсеточной вязкости в зависимости от горизонтальных градиентов скорости [15]. Компоненты тензора турбулентных напряжений Рейнольдса τ_{ij} в (1), (2) определяются через градиенты скорости средних течений согласно формулам

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

На свободной поверхности удовлетворяются кинематическое и динамические условия.

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

при этом $\tau_{0x} = C_a W_x |\mathbf{W}|$ и $\tau_{0y} = C_a W_y |\mathbf{W}|$ — проекции касательных напряжений ветра [11]; \mathbf{W} — вектор скорости ветра на высоте 10 м над уровнем моря; C_a — эмпирический коэффициент поверхностного трения [16], который варьируется в зависимости от величины скорости ветра

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

На дне ($z = -H(x, y)$) нормальная составляющая скорости равна нулю, придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью [3, 4].

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

де $\tau_{1x} = C_b u \sqrt{u^2 + v^2}$, $\tau_{1y} = C_b v \sqrt{u^2 + v^2}$, C_b — коэффициент донного трения, который находится по формуле $C_b = \max\{k^2(\ln h_b/z_0)^{-2}; 0,0025\}$, где h_b — шаг по вертикали в придонном слое; $z_0 = 0,003$ м — параметр шероховатости, характеризующий гидродинамические свойства подстилающей донной поверхности. Значения z_0 определяются с помощью теории Гранта—Мадсена, описывающей механизм влияния волн на течения в придонном пограничном слое. На твердых боковых границах выполняются условия прилипания. В начальный момент времени ($t = 0$) движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна.

Для расчета распространения примеси концентрацией $C(x, y, z, t)$ используем уравнение переноса и диффузии [3, 5]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial C}{\partial z} \right). \quad (9)$$

Здесь A_H — коэффициент горизонтальной и K_H — вертикальной турбулентной диффузии. К динамическим граничным условиям на свободной поверхности и в придонном слое (6) — (9) добавляются условия отсутствия потоков примеси через свободную поверхность, боковые стенки (S) и дно бассейна.

$$\left(K_H \frac{\partial c}{\partial n}\right)\Big|_{z=\zeta} = 0, \quad \left(A_H \frac{\partial c}{\partial n}\right)\Big|_S = 0, \quad \left(K_H \frac{\partial c}{\partial n}\right)\Big|_{z=-H} = 0. \quad (10)$$

При этом рассматривается цилиндрическая область загрязнения заданного радиуса, расположенная в поверхностном слое центральной части моря, глубиной равной толщине поверхностного слоя. В начальный момент времени ($t = t_0$) распределение примеси задается соотношением

$$C_0(x, y, z, t_0) = \begin{cases} 1; & r < R, 0 \geq z \geq h_1; \\ 0; & r \geq R, z < 0; \quad r < R, z < h_1, \end{cases} \quad (11)$$

где h_1 — толщина этого слоя; R — радиус области загрязнения, $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ — расстояние от центра (x_0, y_0) до точки, в которой оно вычисляется. В качестве параметров, характеризующих эволюцию пассивной примеси, выбраны: время ее рассеивания (t_d), коэффициент максимальной площади ее распространения на различных горизонтах (K_{\max}) и соответствующий этому момент времени (t_{\max}). Соотношение для расчета площади охваченной загрязнением имеет вид: $K_{\max} = S_{\max}/S_0$, где S_0 — площадь области начального загрязнения в поверхностном слое, S_{\max} — наибольшее значение этой площади на рассматриваемом горизонте в процессе трансформации примеси. Условием полного рассеивания загрязнения принимается величина ее концентрации, не превышающая $2,5 \cdot 10^{-2}$ во всей акватории моря.

Для построения численного алгоритма использована модель РОМ [11], адаптированная к условиям бассейна Азовского моря [3, 7, 8]. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости для баротропных волн [12]. Пространственное разрешение модели по широте и долготе составляет $(1/59) \times (1/84)$, при котором линейные размеры ячейки $\Delta x = \Delta y = 1,4$ км, количество узлов горизонтальной сетки равно 276×176 . Число расчетных уровней по вертикали — одиннадцать. Уравнения интегрируются 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. Для численной реализации поставленной задачи выполняется переход от координаты z к сигма-координате [3, 7, 11].

Топография дна Азовского моря 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. Информация о полях ветра и атмосферного давления, используемых в вычислительных экспериментах

Модельная система SKIRON создавалась и развивалась в Афинском Университете группой Атмосферного Моделирования и Прогноза Погоды (Atmospheric Modeling and Weather Forecasting Group) [13]. Модель базируется на ETA модели, которая первоначально разрабатывалась в Университете Белграда. Основное развитие модели ETA было обеспечено NCEP. Результаты прогноза по модели SKIRON, используемые в данной ра-

боте, были получены МГИ РАН в качестве полноправного участника проекта MFSTEP. Данный вариант модели дает детальный 72-часовой прогноз метеорологических параметров для Азово-Черноморского и Средиземноморского бассейнов. Первые 48 часов вывод данных осуществляется через 2 часа, далее значения выводятся через 6 часов. Расчет параметров производится на сетке с шагом 0,1 градус широты по осям x и y . Всего выводится 16 различных параметров, в том числе, данные по скорости приводного ветра. Данные модели SKIRON были интерполированы на расчетную сетку бассейна Азовского моря с горизонтальным разрешением 1,4 км.

В атмосфере наблюдается большое разнообразие атмосферных движений, что обусловлено влиянием сил различного происхождения. Макромасштабные атмосферные процессы большой длительности с масштабом порядка тысяч километров (планетарный масштаб, зональные переносы), учет которых необходим при долгосрочных прогнозах динамики вод природных бассейнов, образуют единую систему над всем земным шаром и являются колебаниями глобальной циркуляции атмосферы. Для краткосрочных прогнозов особый интерес представляют мезомасштабные атмосферные движения, имеющие горизонтальные размеры порядка 100 км и микромасштабные с масштабом движения порядка 10 км и менее, связанные с местными влияниями топографии в самом ограниченном масштабе и с мелкомасштабными вихрями.

В данной работе исследовано влияние динамики вод Азовского моря, вызванной системами движения атмосферы синоптического масштаба, имеющими указанные горизонтальные размеры и время существования до нескольких суток на процессы, возникающие при микромасштабной атмосферной циркуляции. Исходным материалом атмосферной циркуляции явились массивы данных региональной атмосферной модели SKIRON для типичного, сезонного случая штормовой погоды с 8 по 18 сентября 2007 г. В результате серии численных экспериментов сделаны выводы о влиянии стационарных течений на динамические процессы и эволюцию загрязнений в Азовском море, вызванные неоднородными по времени и пространству атмосферными полями ветра и давления.

Стационарные течения в Азовском море вызываются действием ветра, скорость которого на поверхности моря не зависит от x и y , а первые три часа ($0 < t < 3$ ч) нарастает со временем по линейному закону, достигает наибольшего значения и далее не меняется ($t \geq 3$ ч). При этом направления однородных по пространству и времени ветровых воздействий отвечают характерным для Азово-Черноморского региона [1, 6] зональным восточному и западному ветрам.

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, на основании серии численных экспериментов, находим время установления стационарных фоновых течений ($t_0=48$ ч).

Кроме постоянного однородного ветра акватория Азовского моря находится под воздействием полей переменного по времени и неоднородного по пространству ветра и атмосферного давления. В качестве таких полей используются поля приводного ветра атмосферной модели SKIRON [13], отвечающие штормовой ситуации с 8 по 18 сентября 2007 г. Действие этого (прогностического) ветра при наличии и отсутствии фоновых течений в море численно исследуется в течение 10 сут. Результаты расчетов первых трех суток не

анализируются и применяются для получения начальных данных о скоростях течений и уровне моря на 0 ч 11 сентября 2007 г.

От момента установления движения жидкости ($t > t_0$) к постоянному ветру ($\mathbf{W}_{st}=\text{const}$, $t \geq 3$ ч) присоединяется действие неоднородного поля ветра, полученного по данным атмосферной модели SKIRON (\mathbf{W}_{SKIRON}). При этом, постоянное давление (P_{atm}) в (1) — (4) заменяется переменным значением P_{SKIRON} . Таким образом, от момента времени $t > t_0$ квазистационарную составляющую течений в море поддерживает \mathbf{W}_{st} , а нестационарную добавляет \mathbf{W}_{SKIRON} . Моделирование фоновых течений выполняется западным ветром со скоростями $\mathbf{W}_{st}^1=5$ м/с и $\mathbf{W}_{st}^2=10$ м/с.

В табл. 1 приведены максимальные скорости при различном направлении ветра \mathbf{W}_{SKIRON} как функции времени (над Азовским морем). При этом между двумя соседними значениями времени скорость ветра меняется монотонно. Величина отклонения вектора скорости ветра от направления оси x (на восток под углом 50° к параллели) указана в градусах. Отсюда видно, что за рассматриваемый период (192 ч) наибольшее, среднее и наименьшее значения максимальной скорости равны 12,7; 6,7 и 1,6 м/с соответственно. Преобладающими направлениями ветра являются северо-восточное и северо-западное.

Таблица 1

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

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

На рис. 1 показаны векторные поля прогностического ветра над Азовским морем, которые соответствуют экстремальным значениям его скорости или резким переменам направления. Первая экстремальная ситуация возникает через 36 ч (рис. 1, *a*). Над южной частью отмечается антициклоническое воздействие, а в северной части моря скорость ветра на отдельных участках достигает 10 м/с. Через 68 ч со скоростью 15 — 20 м/с перемещаются два небольших циклона (рис. 1, *b*), которые формируются в восточной и западной частях моря. Следующие максимумы скоростей ветра приходятся на 90 и 140 ч, они соответствуют обширным циклоническим образованиям (рис. 1, *в*, *г*). На рис. 1, *д*, *e* показаны поля ветра с экстремумами скорости в моменты времени 152 и 168 ч. В дальнейшем до 18 сентября над Азовским морем скорость ветра уменьшается и его направление практически не меняется.

Как следует из анализа величин атмосферного давления P_{SKIRON} в период с 8 по 18 сентября 2007 г., штормовая ситуация сопровождалась существенным понижением атмосферного давления при прохождении циклона 16 сентября.

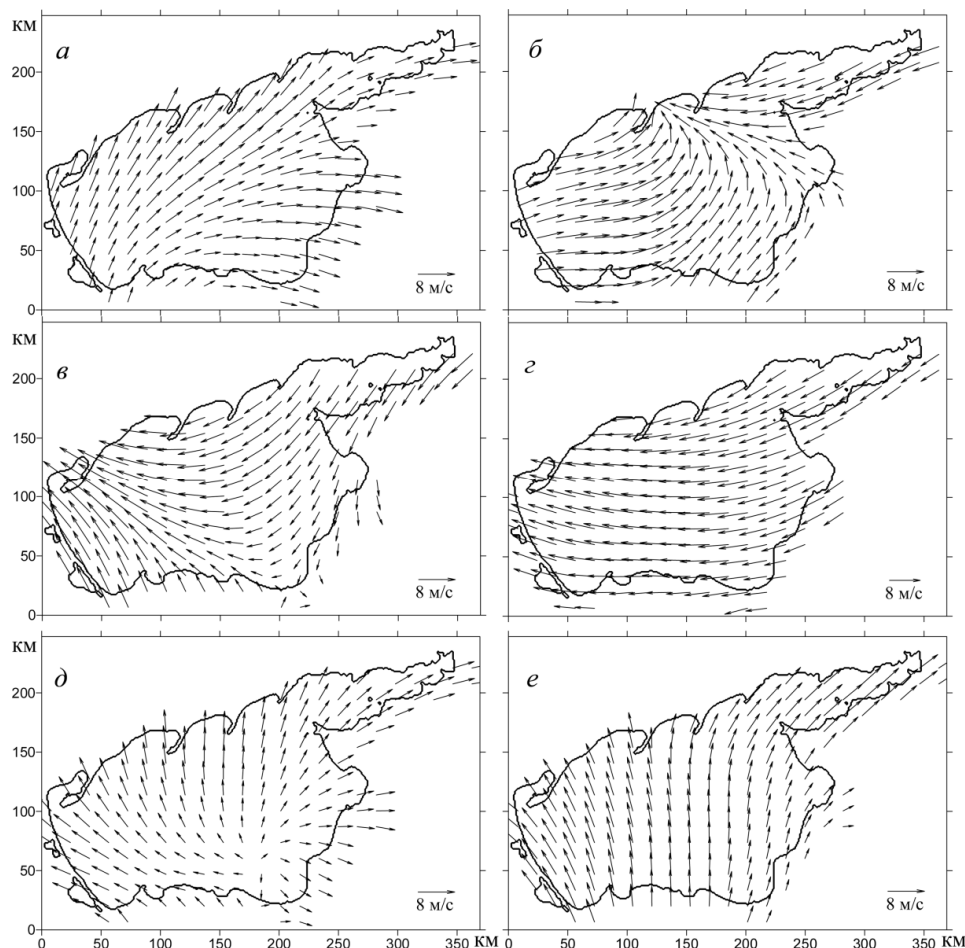


Рис. 1. Поля прогностического ветра в различные моменты времени от 0 ч 11 сентября 2007 г.: 36 ч (а); 68 ч (б); 90 ч (в); 140 ч (г); 152 ч (д); 168 ч (е)

3. Анализ результатов численных расчетов

3.1. Исследование влияния фоновых течений на динамические процессы в Азовском море, возникающие под действием атмосферных полей, полученных по данным модели SKIRON

В первой серии численных экспериментов исследуется влияние совместного действия ветров ($\mathbf{W}_{st} + \mathbf{W}_{SKIRON}$ — стационарного и прогностического) на максимальные скорости течений и экстремальные значения сгонов и нагонов. Полученные результаты сравниваются с данными расчетов, выполненных при моделировании волновых процессов в Азовском море, которые вызваны только постоянным или только прогностическим ветром. Численные эксперименты реализованы для двух скоростей западного стационарного ветра с целью исследования влияния возникающих при этом фоновых

течений на отклонения уровня моря и поля скоростей неустановившихся течений, вызванных в дальнейшем действием полей прогностического ветра.

В табл. 2 приведены максимальные значения скоростей течений, вызванных постоянным ($\mathbf{W}_{st}^{1,2}$) и только прогностическим (\mathbf{W}_{SKIRON}) ветрами, а также их совместным действием ($\mathbf{W}_{st}^{1,2} + \mathbf{W}_{SKIRON}$).

Таблица 2

Максимальные значения скоростей течений ($|\mathbf{U}|_{\max}$) на различных глубинах Азовского моря, время их достижения (t_{\max}) и соответствующие им координаты

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

Из анализа этих данных следует, что при совместном действии ветров максимумы скоростей нестационарных течений увеличиваются. Так, при $\mathbf{W}_{st}^1 + \mathbf{W}_{SKIRON}$ величина $|\mathbf{U}|_{\max}$ в 1,52; 1,50; 1,48 и 1,29 раза больше, чем при \mathbf{W}_{SKIRON} на горизонтах 1; 3; 5 и 10 м соответственно. Аналогично при $\mathbf{W}_{st}^2 + \mathbf{W}_{SKIRON}$ значение $|\mathbf{U}|_{\max}$ в 1,9; 1,84; 1,75 и 1,58 раза больше, чем при \mathbf{W}_{SKIRON} на тех же горизонтах. Легко видеть, что для всех значений скоростей ветра \mathbf{U}_{\max} монотонно убывает с увеличением горизонта. Отметим также, что значения \mathbf{U}_{\max} на рассматриваемых горизонтах при \mathbf{W}_{st}^1 и \mathbf{W}_{SKIRON} отличаются не более чем на 5%.

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

Таблица 3

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

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

Поля уровня моря Азовского моря, полученные в результате моделирования, показаны на рис. 2.

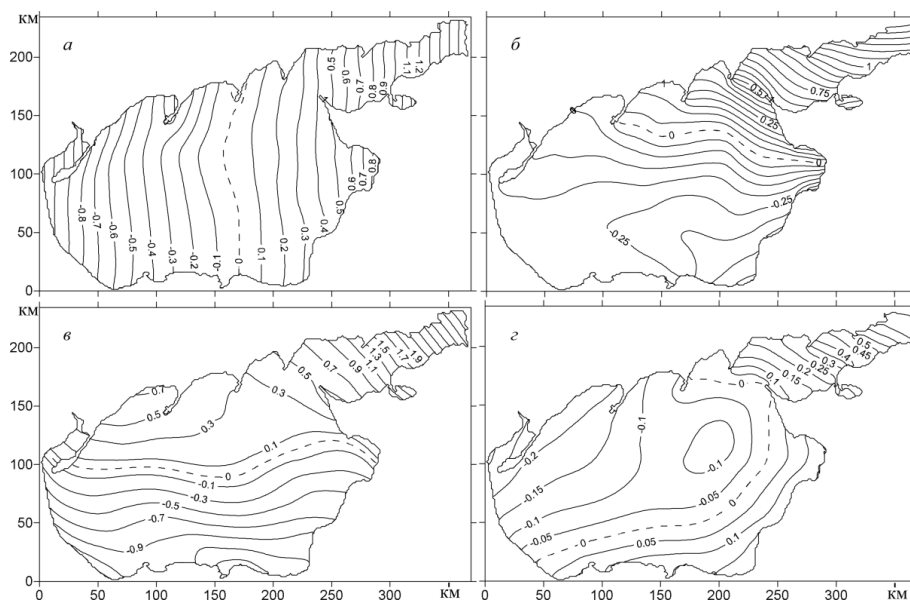


Рис. 2. Поля уровня Азовского моря в различные моменты времени: стационарный режим, 48 ч (а); 68 ч (б); 90 ч (в); 140 ч (г)

В установившемся режиме (рис. 2, а) отмечаются понижения уровня вдоль западного побережья (сгоны) и повышения — вдоль восточного (нагоны). Узловая (штриховая) линия пересекает центральную часть моря, она ориентирована перпендикулярно

направлению ветра. С началом действия нестационарного ветра (рис. 2, б — г) области сгона и нагона перемещаются вдоль центральной части моря.

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

Таблица 4

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

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

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

(W_{st}^1), 11,1 см (W_{st}^2) и в Темрюке: 8,7 см (W_{SKIRON}), 11,2 см ($W_{st}^1 + W_{SKIRON}$) и 33 см ($W_{st}^2 + W_{SKIRON}$).

3.2. Определение размеров областей осушения и затопления побережья Азовского моря в зависимости от действующего ветра

Выполним анализ протяженности территорий возможных осушений и затоплений, возникающих под действием только постоянного ветра, только прогностических полей, и также в результате совместного действия нестационарных возмущений и фоновых стационарных течений. Зная максимальную величину сгона (нагона) и угол наклона (подъема) рельефа береговой зоны (α), определим размер максимально возможной области осушения (затопления), вызванного действием ветра в различных прибрежных районах. Для Азовского моря характерными являются углы опускания и подъема побережья от 1,5 до 3°.

В табл. 5 даны размеры участков затопления (верхняя часть таблицы) и осушения (нижняя часть), вызванных действием стационарного и прогностического ветров в прибрежных районах Азовского моря.

Таблица 5

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

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

Из анализа приведенных данных следует, что под действием ветра $\mathbf{W}_{st}^2 + \mathbf{W}_{SKIRON}$ наибольшему затоплению (21,8 м) подвергается район Приморско-Ахтарска. При этом протяженность участка осушения в районе Геническа (16,2 м) превосходит значения, полученные для других прибрежных территорий. Сравнивая величины областей затопления и осушения для различных углов наклона береговой зоны, отметим, что при увеличении этих углов размеры районов затопления и осушения уменьшаются.

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

3.3. Сравнение результатов моделирования отклонений уровня моря, вызываемых действием полей атмосферной модели SKIRON, с данными натуральных наблюдений

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

3.4. Исследование влияния фоновых стационарных течений на эволюцию примеси в Азовском море, вызванную действием переменного ветра

Целью следующих численных экспериментов является оценка влияния рассматриваемых полей ветра и возникающих при этом течений на распространение пассивной примеси, поступающей в центральный район моря. Начальное положение выброса на расчетной сетке модели было выбрано при $x_0 = 180$ км, $y_0 = 120$ км, где глубина моря составляет 12 м. Выброс примеси имеет вид цилиндрической области радиусом R и глубиной h_1 ($0 \geq z \geq h_1$, где h_1 — шаг по вертикали в поверхностном слое), заданное соотношением (11). Начальное значение концентрации постоянно в данной области и равно единице ($C(x, y, z, t_0) = C_0(x, y, z) = 1$).

Момент времени выброса загрязнения в экспериментах зависит от полей действующего ветра. Так, для $\mathbf{W}_{st}^{1,2}$ это время совпадает с моментом установления движения жидкости ($t_0 = t_1$), равным 38 и 43 ч соответственно. Для \mathbf{W}_{SKIRON} момент выброса про-

исходит в 0 ч 11 сентября 2007 г. ($t_0 = 72$ ч). Для $\mathbf{W}_{st}^{1,2} + \mathbf{W}_{SKIRON}$ это время определяется следующим образом: $t_0 = t_1 + 72$ ч. При анализе времени распространения и рассеивания примеси принимаем, что во всех случаях момент выброса соответствует начальному значению $t_0 = 0$.

В табл. 6 приведены коэффициент максимального распространения пассивной примеси (K_{max}) с соответствующим ему моментом времени (t_{max} , ч) и время полного рассеивания (t_d , ч) примеси для двух скоростей постоянного ветра, прогностического ветра и их совместного действия. Рассматриваются горизонты ($z = 0$; $z = -H/2$ и $z = -H + h_2$), на которых прослеживаются тенденции эволюции примеси. Согласно приведенным данным, площадь распространения области загрязнения зависит от скорости ветра, приводящего к установившемуся движению. Для большей скорости постоянного ветра (W_{st2}) становятся больше скорости течений. (табл. 2), при этом увеличиваются площадь распространения примеси и время ее полного рассеивания (табл. 5). В связи с этим совместное действие стационарного и прогностического ветром также приводит к увеличению области загрязнения.

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

Таблица 6

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

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

Заключение

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

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

С учетом того, что в последние годы наблюдается рекордное количество стихийных бедствий, влияющих на безопасность коммуникаций Азово-Черноморского региона, имеется много важных направлений исследований. Прежде всего, это оперативное прогнозирование предвестников экстремальных опасных явлений, происходящих в акватории Азовского моря. Для этого необходимы теоретические исследования, позволяющие определить физические закономерности циркуляции вод Азовского моря на основании анализа экстремальных событий. Большой интерес, также, представляет изучение сейшеобразных колебаний на формирование экстремальных уровней и течений в Азовском море.

Литература

1. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Том III. Азовское море. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 218 с.
2. Дацюк В.Н., Крукиер Л.А., Чикин А.Л., Чикина Л.Г. Моделирование экстремального наводнения в дельте Дона на многопроцессорных вычислительных системах // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2014. Т. 3, № 1. С. 80–88.
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: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. 178 с.
4. Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я. Исследование сгонно-нагонных явлений в Азовском море, вызванных атмосферными возмущениями // Доклады НАН Украины. 2006. № 11. С. 109–113.
5. Инжебейкин Ю.И. Особенности формирования кратковременных наводнений и экстремальных течений в Азовском море // Труды Государственного океанографического института. 2011. № 213. С. 91–102.
6. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Беспалова Л.А., Ивлиева О.В., Цыганкова А.Е., Хартиев С.М., Иошпа А.Р., Кропянко Л.В., Сушко К, С., Шевердяев И.В., Беспалова Л.А., Шульга Т.Я. Исследование сгонно-нагонных явлений в Азовском море, вызванных атмосферными возмущениями // Доклады НАН Украины. 2006. № 11. С. 109–113.

- лова Е.В. Современные опасные экзогенные процессы в береговой зоне Азовского моря. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2015. 324 с.
7. Фомин В.В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ. 2002. Вып. 249. С. 246–255.
 8. Фомин В.В., Шульга Т.Я. Исследование волн и течений, возникающих под действием ветра в Азовском море // Доклады НАН Украины. 2006. № 12. С. 110–115.
 9. Черкесов Л.В., Иванов В.А., Хартиев С.М. Введение в гидродинамику и теорию волн. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 264 с.
 10. Шабас И.Н., Чикин А.Л., Чикина Л.Г. Математическое моделирование задач переноса многокомпонентных примесей в Азовском море на многопроцессорных вычислительных системах // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 12 (161). С. 200–210.
 11. 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. No. 4. P. 1–16. DOI: 10.1029/co004p0001.
 12. Courant R., Friedrichs K.O., Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics // IBM J. 1967, March. P. 215–234.
 13. URL: <http://forecast.uoa.gr> (дата обращения: 30.08.2016).
 14. Mellor G.L. and Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys. 1982. Vol. 20, No. 4. P. 851–875. DOI: 10.1029/rg020i004p00851.
 15. Smagorinsky J. General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment // Mon. Wea. Rev. 1963. Vol. 91, No 3. P. 99–164. DOI: 10.1175/1520-0493(1963)091<0099:gcewtp>2.3.co;2.

Черкесов Леонид Васильевич, член-корреспондент НАН Украины, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, отдел теории волн, Морской гидрофизический институт РАН (Севастополь, Российская Федерация)

Шульга Татьяна Яковлевна, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, отдел теории волн, Морской гидрофизический институт РАН (Севастополь, Российская Федерация)

DOI: 10.14529/cmse170104

STUDY OF STATIONARY CURRENTS FOR DYNAMIC PROCESSES AND ADMIXTURES OF POLLUTION IN THE SEA OF AZOV

© 2017 L. V. Cherkesov, T. Ya. Shul'ga

Federal Federal State Budget Scientific Institution "Marine Hydrophysical Institute of RAS"

(Kapitanskaya, 2, Sevastopol' 299011 Russia)

E-mail: tyshulga@mail.ru

Received: 20.10.2016

With the use of three-dimensional nonlinear mathematical model dynamic processes and features of transformation are studied admixtures in the Sea of Azov, caused the action of variable wind and atmospheric pressure

at presence of stationary currents. On the basis of results of numeral calculations conclusions are done about influence of sizes of speeds of stationary flows on the maximal rejections of level and speed of non-stationary currents, generated the fields of wind, SKIRON got on an atmospheric model.

The analysis of influence of change intensity of stationary flows is executed on the sizes of areas of drainage and submergence in off-shore districts exterminating depending on the angle of slope (getting up) of relief of waterside area. It is set that the united action permanent and wind was simulated with the SKIRON weather forecasting system result in the substantial increase of area of distribution of passive admixture and time of its dispersion as compared to influence only of stationary currents.

Keywords: numerical modeling, sigma-coordinate model, dynamic processes, stationary currents, areas of drainage and submergence, evolution of passive admixture.

FOR CITATION

Cherkesov L.V., Shul'ga T.Ya. Study of stationary currents for dynamic processes and admixtures of pollution in the sea of Azov. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2017. vol. 6, no. 1. pp. 56–72. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse170104.

References

1. *Gidrometeorologicheskie usloviya shel'fovoj zony morej SSSR. Tom III, Azovskoe more* [Hydrometeorological conditions of the shelf zone of the seas of the USSR. Volume III, Sea of Azov]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1986. 218 p. (in Russian)
2. Datsyuk V.N., Krukier L.A., Chikin A.L., Chikina L.G. Simulation of extreme floods in the delta of the Don on multiprocessor computer systems. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Informatics*. 2014. vol. 3, no. 1. pp. 80–88. (in Russian)
3. Ivanov V. A., Cherkesov L. V., Shul'ga T. Ya. Dinamicheskie processy i ih vliyanie na rasprostraneniye i transformaciyu zagryaznyayushchih veshchestv v ogranichennyh morskikh bassejnah [Dynamic processes and their influence on the distribution and transformation of pollutants in restricted marine basins]. Sevastopol, NPC «EKOSI-Gidrofizika», 2010. 178 p. (in Russian)
4. Ivanov V. A., Fomin V. V., Cherkesov L. V., Shul'ga T. Ya. Study of rundown-onset events in the Sea of Azov caused by atmospheric fluctuations. *Dopov. Nats. Akad. Nauk Ukraini*. 2006. no. 11, 109–113.
5. Inzhebeykin Yu.I. Features of formation of short-term flooding and extreme currents in the sea of Azov. *Tr. Gos. Meteorol. Inst.* 2011. vol. 213. pp. 91–102.
6. Matishov G.G., Berdnikov S.V., Bepalova L.A., Ivlieva O.V., Tsyigankova A.E., Hartiev S.M., Ioshpa A.R., Kropyanko L.V., Sushko K, S., Sheverdyayev I.V., Bepalova E.V. Modern hazardous exogenous processes in the coastal zone of Azov Sea. Rostov-on-Don, Publishing of the South Federal University, 2015. 324 p. (in Russian)
7. Fomin V. V. Numerical model of the circulation of the Azov Sea water. *Tr. Ukr. Nauchno-Issled. Gos. Meteorol. Inst.* 2002. vol. 249. pp. 246–255.
8. Fomin V. V., Shul'ga T. Ya. Study of the waves and currents caused by the wind in the Sea of Azov. *Dopov. Nats. Akad. Nauk Ukraini*. 2006. no. 12. pp. 110–115.
9. Shabas I.N., Chikin A.L., Chikina L.G. Mathematical modeling of the problems of multi-component pollution transport in the sea of Azov on the multiprocessor computing systems. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2014. no. pp. 200–210.

10. Cherkesov L. V., Ivanov V. A., Khartiev S. M. *Vvedenie v gidrodinamiku i teoriiy voln* [Introduction into Hydrodynamics and Wave Theory]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 1992. 264 p. (in Russian)
11. 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. no. 4. pp. 1–16. DOI: 10.1029/co004p0001.
12. Courant R., Friedrichs K.O., Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics. *IBM J.* 1967, March. pp. 215–234.
13. URL: <http://forecast.uoa.gr> (accessed: 30.08.2016).
14. Mellor G. L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.* 1982. vol. 20, no. 3. pp. 851–875. DOI: 10.1029/rg020i004p00851.
15. Smagorinsky J. General circulation experiments with primitive equations, I. The basic experiment. *Mon. Wea. Rev.* 1963. vol. 91, no 3. pp. 99–164. DOI: 10.1175/1520-0493(1963)091<0099:gcewtp>2.3.co;2.