

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК СГОННО-НАГОННЫХ КОЛЕБАНИЙ АЗОВСКОГО МОРЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ БАРИЧЕСКОГО ВОЗМУЩЕНИЯ

*A.Е.Букатов, Д.Д.Завьялов,
T.A.Соломаха*

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2
E-mail: oaoi@alpha.mhi.iuf.net

Рассматривается влияние атмосферных возмущений на сгонно-нагонные колебания Азовского моря. Проведены численные эксперименты, использующие конечно-элементную модель сгонно-нагонных колебаний и полуэмпирические модели приземного атмосферного давления и ветра. Дан сравнительный анализ влияния параметров и вида барического возмущения на колебания уровня моря и скорости течений.

Введение. Азовское море представляет собой мелководный, внутренний водоем, поэтому сгонно-нагонные процессы играют доминирующую роль в динамике водных масс. Прогноз сгонно-нагонных колебаний является определяющим в вопросах безопасности судоходства и ведения хозяйственной деятельности в прибрежной зоне. Сгонно-нагонные колебания уровня Азовского моря настолько сильно развиты, что даже в среднем многолетнем масштабе отражаются в наклоне плоскости поверхности моря вдоль осей симметрии Таганрогского залива и собственно моря. Наклон уровня Азовского моря от вершины Таганрогского

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_1^2}{H} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_1 q_2}{H} \right) &= f q_2 + \gamma^2 \rho_a W^2 \cos \theta - \frac{g q_1 \sqrt{q_1^2 + q_2^2}}{C^2 \rho H^2} - \rho g H \frac{\partial(H-h)}{\partial x} - H \frac{\partial P}{\partial x}, \\ \frac{\partial q_2}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_1 q_2}{H} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_2^2}{H} \right) &= -f q_1 + \gamma^2 \rho_a W^2 \sin \theta - \frac{g q_2 \sqrt{q_1^2 + q_2^2}}{C^2 \rho H^2} - \rho g H \frac{\partial(H-h)}{\partial y} - H \frac{\partial P}{\partial y}, \\ \frac{\partial q_1}{\partial x} + \frac{\partial q_2}{\partial y} + \frac{\partial(\rho H)}{\partial t} &= 0 \end{aligned}$$

где g – ускорение силы тяжести; f – параметр Кориолиса; P – атмосферное давление на поверхности воды; ρ , ρ_a – плотность воды и воздуха; W – скорость ветра; θ – угол между осью x и направлением ветра; $C = 0.16 L n^{-2} (0.01 H)$ – коэффициент

залива до Керчи составляет в среднем 16 см. Сгонно-нагонные колебания Азовского моря происходят чаще всего осенью и зимой при преобладающих здесь восточных, северо-восточных, западных и юго-западных ветрах. Мелководность Азовского моря позволяет применить для численных расчетов сгонно-нагонных колебаний конечно-элементную модель, основанную на уравнениях длинных волн [1,2]. В данной работе рассмотрены модели барических возмущений, описывающие типичные поля приземного давления и ветра [3,4] и дан сравнительный анализ вызванных ими сгонно-нагонных колебаний.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу о динамике воды в Азовском море. За основу математической модели примем проинтегрированные по вертикали уравнения неразрывности и движения мелкой воды, записанные через две компоненты горизонтального потока количества жидкости

$$q_1 = \int_{-h}^{\zeta} u dz, \quad q_2 = \int_{-h}^{\zeta} v dz$$

и сумму $H = \zeta + h$ отклонения свободной поверхности ζ от невозмущенного уровня и глубины h бассейна. Здесь u, v – составляющие мгновенной скорости жидких частиц. На твердой границе зададим условие непротекания $q_n = 0$. Втекающие по горизонтали потоки жидкости не моделировались. Начальные условия принимались в виде $H(x, y, t = 0) = H_0$,

$$q_1(x, y, t = 0) = 0, \quad q_2(x, y, t = 0) = 0.$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_1}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_1^2}{H} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_1 q_2}{H} \right) &= f q_2 + \gamma^2 \rho_a W^2 \cos \theta - \frac{g q_1 \sqrt{q_1^2 + q_2^2}}{C^2 \rho H^2} - \rho g H \frac{\partial(H-h)}{\partial x} - H \frac{\partial P}{\partial x}, \\ \frac{\partial q_2}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_1 q_2}{H} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_2^2}{H} \right) &= -f q_1 + \gamma^2 \rho_a W^2 \sin \theta - \frac{g q_2 \sqrt{q_1^2 + q_2^2}}{C^2 \rho H^2} - \rho g H \frac{\partial(H-h)}{\partial y} - H \frac{\partial P}{\partial y}, \\ \frac{\partial q_1}{\partial x} + \frac{\partial q_2}{\partial y} + \frac{\partial(\rho H)}{\partial t} &= 0 \end{aligned}$$

Шези; коэффициент ветрового напряжения $\gamma = 0.0012$ при скоростях приводного ветра $W \leq 11$ м/с и $\gamma = 0.001(0.49 + 0.065 W)$ при $W > 11$ м/с. Конечно-элементная формулировка рассматриваемой задачи представлена в [5].

Модели полей приземного атмосферного давления и ветра. Полуэмпирические модели полей атмосферного давления и ветра достаточно обобщенно описывают основные динамические особенности движущегося барического возмущения типа циклона. Поле атмосферного давления в циклоне представляет собой систему замкнутых изобар с минимальным давлением P_0 в центре системы. Внешняя замкнутая изобара имеет значение близкое к нормальному давлению P_1 . Размеры циклонов весьма разнообразны, но для южных циклонов характерный радиус не превышает 500 км. Это обстоятельство позволяет считать поле давления в циклоне осесимметричным. Нестационарное поле атмосферного давления и поле ветра в циклоне представлены в виде двух моделей. Модели поля ветра рассматриваются в цилиндрической системе координат, расположенной в касательной плоскости к Земле, с началом координат в центре циклона (x_0, y_0).

Модель 1. Аппроксимация поля атмосферного давления имеет вид [3]

$$P = P_1 - \Delta P \exp(-br^2). \quad (1)$$

Здесь и далее r -расстояние от точки (x, y) до центра циклона, $b = \ln(\Delta P P_1^{-1}) R^{-1/2}$ - эмпирический параметр, связанный с внешним радиусом циклона R , $\Delta P = P_1 - P_0$.

На высотах порядка 1 км выполняется соотношение для градиентного ветра

$$V_g = -\frac{fr}{2} + \sqrt{\left[\frac{fr}{2}\right]^2 + \frac{r}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial r}}. \quad \text{Составляющие скорости приводного ветра}$$

$$V_r = 0.7 |V_g| \beta \sin \alpha, \quad V_t = 0.7 |V_g| \beta \cos \alpha. \quad (2)$$

Здесь α - угол между направлением ветра и касательной к изобаре, $\beta = (1 + 10/r^2)^{-1}$ - эмпирическая формула, учитывающая зависимость угла α от расстояния до центра циклона.

Модель 2. Из наблюдений известно, что вокруг центра циклона существует небольшая область, где давление также мало. Поэтому давление в глазе имеет не только минимум, но и производные по радиусу должны быть равны нулю до достаточно высокого порядка. Аппроксимация поля приземного давления, учитывающая данные особенности, имеет вид [4]

$$P = P_0 + \Delta P \frac{r^m}{a + r^m} \left(1 + \lambda \frac{r}{a + r} \ln^2(dr)\right) \quad (3)$$

Здесь r - расстояние, нормированное на 10 км; m , a , λ , d - эмпирические коэффициенты. Задача о связи поля ветра с полем давления сводится к решению трех уравнений движения частиц воздуха в цилиндрической системе координат. Производные по полярному углу в осесимметричном циклоне равны нулю. Компоненты скорости приземного ветра имеют вид

$$V_r = \frac{\phi^{1/2}}{r}, \quad V_t = -p \frac{\phi^{1/2}}{r}, \quad (4)$$

$$\phi = r^{2\mu} \left(\text{const} - \frac{2}{p+1} \int_0^r r^{3-2\mu} \frac{\partial p}{\partial r} dr \right).$$

Параметр p отвечает за скорость затухания с высотой возмущения поля давления и имеет оценку $p \approx 1.2$, $\mu = \sqrt{1+1/p}$. Постоянная интегрирования выбирается из условия, чтобы функция ϕ была неотрицательная. Для этого достаточно приравнять нуль выражение в скобках, положив верхний предел интеграла равным значению радиуса циклона R .

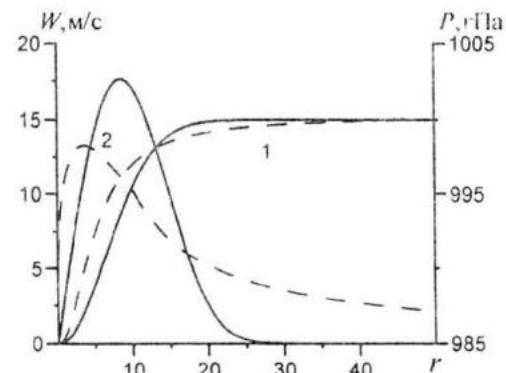


Рисунок I – Профили приземного давления (линии 1); горизонтальной компоненты скорости ветра (линии 2);

Для сравнения на рисунке I представлены радиальные профили приземного давления (правая ось) и горизонтального компонента скорости приземного ветра $W = \sqrt{V_r^2 + V_t^2}$ (левая ось). Здесь и далее P_0, P_1 равны 985, 1000 гПа, $R=500$ км; a, d, m, p, λ равны соответственно 25; 0.05; 2; 1; 0.02. Модель 1 – сплошные, а модель 2 – штриховые линии. Ось r – нормированное на 10 км расстояние от центра циклона.

Видно, что радиальные профили приземного давления в представленных моделях качественно похожи. Отличия имеют место лишь при рассмотрении радиального компонента барического градиента. Для второй модели локальный максимум градиента давления расположен ближе к цен-

тру циклона и более ярко выражен. Кроме того, во второй модели, по сравнению с первой, область максимальных ветров находится ближе к центру циклона, а убывание скорости горизонтальной компоненты приземного ветра происходит медленнее.

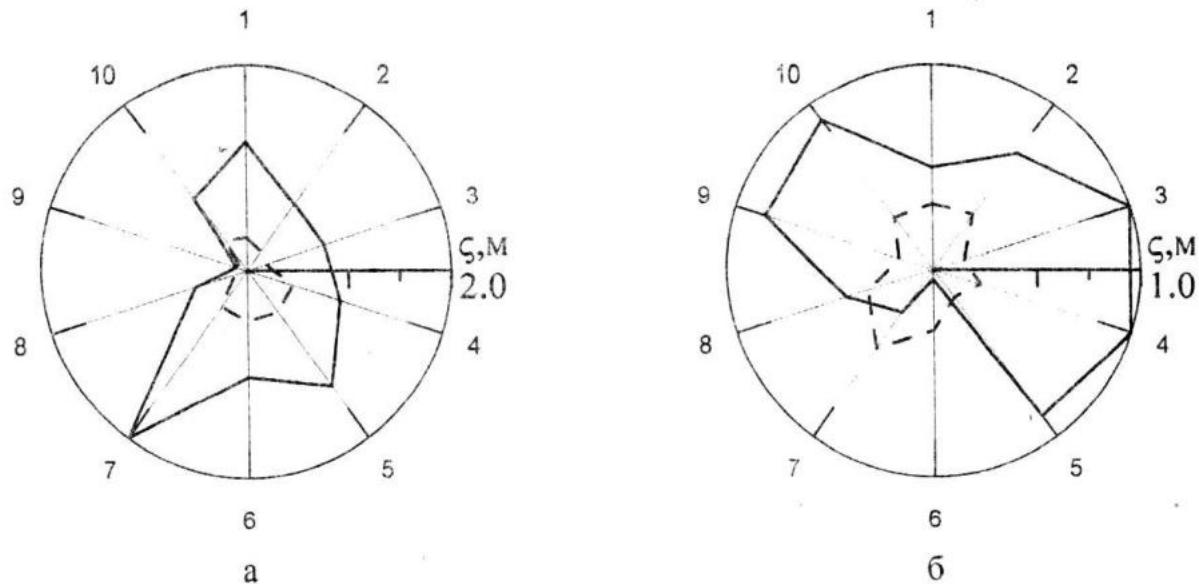


Рисунок 2 – Максимальные амплитуды сгонно-нагонных колебаний
Сплошная линия – модель 1; штриховая – модель 2.

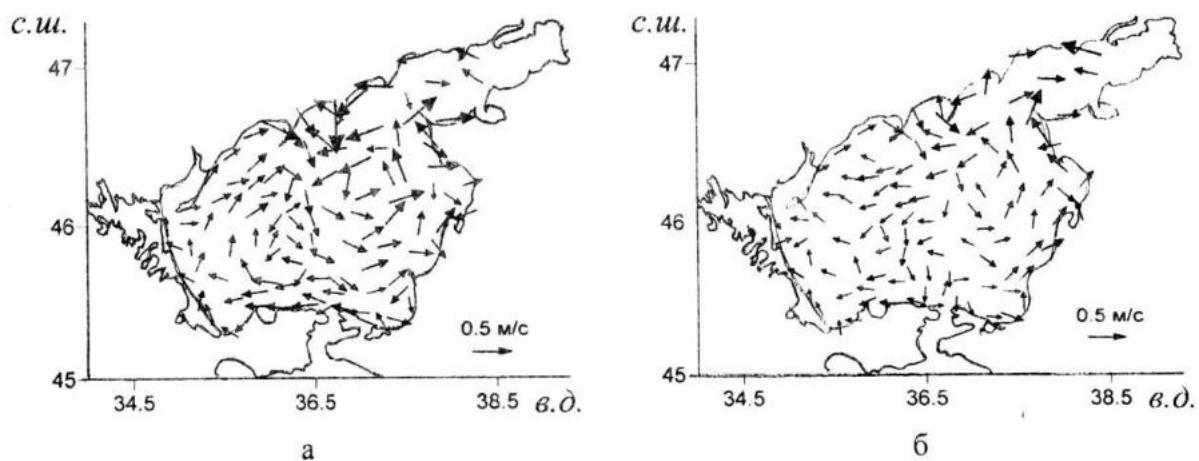


Рисунок 3 – Поле скорости горизонтальных течений, сформированных циклоном

Численный эксперимент. Анализ результатов. На основе конечно-элементной гидродинамической модели проведены численные эксперименты, моделирующие волновые процессы в Азовском море, вызванные воздействием движущегося барического возмущения типа циклон. Расчетная область представлена 174 треугольны-

ми элементами и содержит 108 узловых точек [5]. Поле атмосферного давления и связанное с ним поле ветра рассчитывалось по представленным полуэмпирическим моделям циклона (1) – (4), траектория перемещения которого задавалась законом движения его центра $x_0 = x_0(0) + c_x t$, $y_0 = y_0(0) + c_y t$. Здесь c_x, c_y – проекции

вектора скорости движения циклона W_c на горизонтальные оси. В начальный момент времени положение центра циклона задавалось так, чтобы расстояние от центра до ближайшей граничной точки моря равнялось радиусу циклона R . Результаты, представленные на рисунках 2,3, получены при движении центров модельных циклонов с юго-запада на северо-восток, со скоростью $W_c=5$ м/с. Модельное расчетное время составляет 36 ч с шагом по времени $\Delta t = 200$ с. Результаты показали, что за время прохождения циклона по акватории моря наблюдаются непериодические колебания его уровня. Данный процесс характеризуется существенной нестационарностью. Наибольшие отклонения уровня моря от невозмущенного состояния отмечаются непосредственно под циклоном. На рисунке 2 представлены диаграммы абсолютных значений максимальных сгонов (a) и сгнов (b) в прибрежных пунктах: Счастливцево, Степановка, Приморск, б. Таранья, Мариуполь, Таганрог, Приморско-Ахтарск, Темрюк, м. Зюк, Каменское. Они соответствуют номерам 1-10 на диаграммах. Видно, что при рассмотрении давления вида (1), (3) качественная картина распределения максимальных сгонов и сгнов примерно одинакова. Наибольшее поднятие уровня наблюдается в юго-восточной части моря (пункт 7), а наименьшее в южной (пункт 9). Во всех остальных прибрежных районах максимальное поднятие уровня примерно одинаково. В пунктах 3,4,5 (север, северо-запад) и 9,10 (юг, юго-запад) наблюдаются наибольшие сгоны. Полученные абсолютные значения изменения уровня для первой модели атмосферного давления больше, чем для второй. Отметим, что модуль отношения максимальных значений поднятия уровня к его понижению для второй модели не превышает 3 (пункт 5), для первой – 20 (пункт 6). Это объясняется более медленным убыванием значения горизонтальной компоненты приземного ветра вдоль радиуса циклона во второй модели, чем в первой.

На рисунке 3 представлены расчетные схемы течения в момент времени прохождения центра циклона над центром Азовского моря. Стрелками показано направление течения, а длина линий со стрелками характеризует величину скорости в данной

точке. Приведенные схемы показывают осредненную по глубине систему течений. Модель 1- рисунок 3.а, модель 2 - рисунок 3.б. На двух схемах прослеживаются течения, проходящие вдоль берегов. Максимальные скорости течений наблюдаются непосредственно в центре моря и у входа в Таганрогский залив. Их значения не превышают 0.8 м/с для первой модели и 0.6 м/с для второй, а среднее значения скорости течений равны 0.22;0.13, соответственно. В момент прохождения центра циклона над серединой Азовского моря наблюдаются две системы течений: циклоническая на востоке и антициклоническая на западе моря. Отметим, что при рассмотрении второй аппроксимации приземного давления, сформированная им область циклонической циркуляции более локализована и смешена к восточному побережью, а антициклонический круговорот выражен слабее, по сравнению с первой моделью.

Таким образом, на основе конечно-элементной модели проведен численный анализ отклика Азовского моря на движущиеся барическое возмущение. Показано, что в случае экспоненциального распределения давления в циклоне, абсолютные значения амплитуд смещения уровня моря и скорости течений большие, чем для второй модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коннор Дж., Бреббия К. Метод конечных элементов в механике жидкости. – Л.: Судостроение, 1970.– 269 с.
2. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. – М.:Мир, 1976.– 464 с.
3. Григоркина Р.Г., Фукс В.Р. Воздействие тайфунов на океан. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986.–242с.
4. Добрышман Е.Д. О связи кривизны радиального профиля приземного давления со структурой поля ветра в тайфуне. Физика атмосферы и океана. 2004.–том 40.– №4.– С.459 – 469.
5. Букатов А.Е., Завьялов Д.Д., Соломаха Т.А. Численное моделирование динамики Азовского моря при сгонно-нагонных явлениях. Метеорология и гидрология. 2006.– №6.– С.69 – 75.