

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В КАРКИНИТСКОМ ЗАЛИВЕ ВО ВРЕМЯ ШТОРМА 10–11 НОЯБРЯ 2007 Г.

Д.В. Алексеев, В.А. Иванов, Е.В. Иванча,
В.В. Фомин, Л.В. Черкесов

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

Методом математического моделирования исследуется развитие штормовой ситуации 10–11 ноября 2007 г. в Каркинитском заливе Черного моря. Используются метеорологические характеристики, полученные с помощью региональной прогностической системы SKIRON. Проанализирована связь структуры полей уровня и скоростей течений на разных горизонтах с полями приводного ветра.

Введение. Одной из первоочередных задач рационального освоения морских ресурсов является диагноз и прогноз гидродинамических процессов при различных метеорологических ситуациях. Особенно остро эта задача стоит для таких уникальных водоемов, как Каркинитский залив Черного моря. Залив служит основным местом обитания осетровых рыб в северо-западной части моря [1]. Кроме того, в его акватории расположены орнитологический заповедник «Лебязьи острова» и аквальный комплекс, включающий Бакальскую косу и озеро Бакал, где сосредоточены ценнейшие бальнеологические ресурсы. Каркинитский залив вдается в сушу на 118,5 км. Его глубина в западной части не превышает 36 м, в восточной – 10 м (рисунок 1). В последнее время, вследствие размыва Бакальской косы, появилась угроза затопления илом пляжей, расположенных на берегах озера Бакал [2]. Особенно интенсивный размыв Бакальской косы имел место во время катастрофического шторма 10–11 ноября 2007 г., когда произошло отделение дистальной части косы от ее тела. Развитие штормовой ситуации происходило следующим образом [3]. Ночью с 10 на 11 ноября с Балканского региона на акваторию Черного моря вышел южный циклон и со скоростью 70 км/ч стал перемещаться в сторону Крыма. Это привело к усилению ветра практически над всей акваторией моря. Максимальная скорость ветра достигала

32 м/с. 12–13 ноября центр циклона сместился с Крымского полуострова на север, а над акваторией моря сохранилась область пониженного давления с дождями, низкой облачностью и скоростью ветра не более 7–12 м/с. В данной работе представлены результаты численного моделирования развития штормовой ситуации в Каркинитском заливе в указанный период.

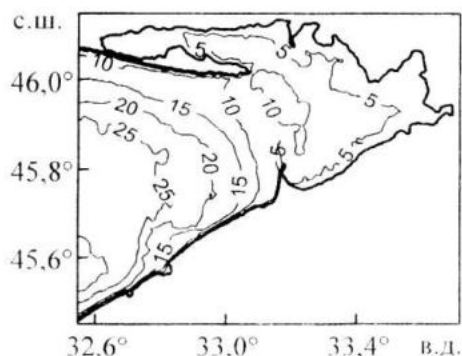


Рисунок 1 – Батиметрия дна (м) Каркинитского залива Черного моря

Математическая модель. Будем исходить из нелинейных уравнений движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении гидростатики [4]

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial \tau_{11}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{12}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right), \\ \frac{dv}{dt} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial \tau_{21}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{22}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right), \\ p &= p_a + g\rho(\eta - z), \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

В (1) u, v, w – компоненты скорости по осям x, y, z , направленным соответственно на восток, север и вертикально вверх; $d/dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x + v\partial/\partial y + w\partial/\partial z$; t – время; f – параметр Кориолиса; p – давление; p_a – атмосферное давление; ρ – плотность воды; g – ускорение силы тяжести; η – уровень моря; τ_{ij} – горизонтальные компоненты тензора турбулентных напряжений Рейнольдса:

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

где A_M и K_M – коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости, вычисляемые, соответственно, по формуле Смагоринского и с использованием теории Мейлора-Ямады порядка 2,5.

На свободной поверхности ($z = \eta(x, y, t)$) для скоростей задаются кинематическое и динамические условия [4]

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y}, \quad (3)$$

$$\rho K_M \left\{ \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = C_A \rho_a \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \{W_x, W_y\},$$

где W_x, W_y – компоненты вектора скорости ветра; $C_A = k^2 \{4,56 - \ln[(W_x^2 + W_y^2)/W_0^2]\}^{-2}$ [5]; $W_0 = 1$ м/с; $k = 0,4$ – постоянная Кармана; ρ_a – плотность воздуха. При расчетах использовались поля ветра и атмосферного давления с пространственным разрешением 10×10 км, выдаваемые региональной прогностической моделью SKIRON [6].

На дне ($z = -H(x, y)$) равна нулю нормальная составляющая скорости, а касательные напряжения определяются через компоненты скорости жидкости [4]

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

$$\rho K_M \left\{ \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = C_D \rho \sqrt{u^2 + v^2} \{u, v\},$$

где $C_D = k^2 [\ln(z_b/z_0)]^{-2}$; $z_0 = 0,001$ м – масштаб шероховатости; z_b – расстояние от дна. На твердых боковых границах выполняются условия прилипания.

Уравнения (1) с граничными условиями (3), (4) после перехода к σ -координатной системе по формуле $\sigma = (z - \eta)/(H + \eta)$ решаются численно [4]. Для повышения пространственного разрешения расчеты гидродинамических полей проводятся на трех вложенных сетках. Первая из них с пространственным разрешением $7,8 \times 7,0$ км покрывает все Черное море. Вторая – с разрешением $1,6 \times 1,4$ км охватывает только северо-западную часть моря. Третья сетка покрывает Каркинитский залив с разрешением 197×281 м. Количество уровней по вертикали на каждой сетке равнялось 15. Расчеты проводятся с 1 ноября 2007 года из

состояния покоя. За это время динамика моря успевает подстроиться к полям ветра.

Результаты численных экспериментов. Рассмотрим временную эволюцию поля уровня и полей скоростей течений на поверхности моря и у дна на разных этапах развития штормовой ситуации. Выход передней части циклона на акваторию Каркинитского залива сопровождается постепенной сменой направления ветра с восточного на юго-восточное и его усилением до 11 м/с к началу 11 ноября. Юго-восточные ветры приводят к возникновению в 3 ч кратковременного сгона в восточной части залива, который по величине не превышает 15 см. Течения на поверхности моря со скоростями, достигающими 0,6 м/с, имеют северо-западное направление. Вблизи Бакальской банки северная компонента становится преобладающей. У дна в наиболее глубоководной западной части залива в поле скорости доминирующей является зональная компонента, направленная с запада на восток.

Выход центра циклона на сушу после 6 ч приводит к ослаблению юго-восточного ветра и уменьшению скоростей течений.

Перемещение над акваторией залива тыловой части циклона сопровождается сменой направления ветра на северо-западное и западное. Максимальной скорости 25 м/с западный ветер достигает в 8–10 ч. По всей акватории Каркинитского залива имеет место подъем уровня, причем в восточной части величины нагонов достигают наибольших значений за все время перемещения циклона, превышая 1 м (рисунок 2а). Направление скоростей течений на поверхности совпадает с направлением ветра практически по всей акватории залива и только при огибании Бакальской косы течения существенно отклоняются от направления ветра. Над Бакальской банкой происходит усиление течений до 1,6 м/с (рисунок 2б). В придонном слое в поле скоростей течений преобладает меридиональная составляющая и только над Бакальской банкой существенна зональная составляющая (рисунок 2в).

При дальнейшем продвижении циклона западные ветры заметно ослабевают, но остаются преобладающими. На поверхности моря течения заметно отклоняются от направления ветра в районах с особенностями батиметрии дна и сложным профилем береговой линии. У дна развивается система

течений, в которой преобладает перенос против ветра с востока на запад.

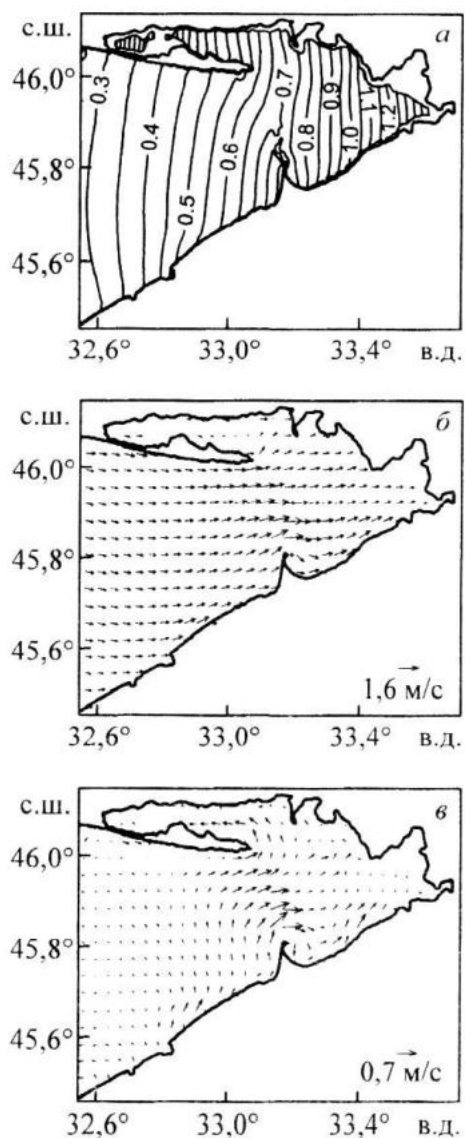


Рисунок 2 – Поля уровня (м) (а), скоростей течений (м/с) на поверхности (б) и на расстоянии 1 м от дна (в) в 10 ч 11 ноября 2007г.

Дальнейшее ослабление ветра приводит к возникновению локальных колебаний в Каркинитском заливе. При этом подъем уровня сменяется кратковременным понижением, которое по абсолютной величине (до 34 см) и по пространственной протяженности заметно больше, чем понижение уровня, имевшее место во время прохождения передней части циклона. Поле течений на поверхности в основном сохраняет свою структуру по сравнению с предыдущим этапом движения циклона, а в придонном слое скорости течений постепенно меняют направления, вплоть до противоположных.

12 ноября преобладают юго-западные и западные ветры, скорость которых постепенно уменьшается. При этом колебания, имеющие место в акватории залива, практически полностью затухают к 13 ноября.

Заключение. Сформулируем основные результаты работы.

Ветры максимальной силы над Каркинитским заливом во время шторма связаны с прохождением тыловой части циклона.

Наибольшие нагоны образуются под воздействием ветров тыловой части циклона, когда их сила максимальна. Наибольшие понижения уровня моря имеют место, когда ветры тыловой части циклона начинают ослабевать.

Поверхностные течения направлены по ветру на всей акватории залива на начальных этапах установления ветровых ситуаций. Со временем наиболее сильное отклонение течений от направления ветра и их локальное усиление наблюдается вдоль Бакальской косы, над Бакальской банкой и в восточной части залива.

Направления течений у дна совпадают с направлением ветра на всей акватории залива только вначале формирования ветровых ситуаций. По мере установления направления ветра в наиболее глубоких частях залива возникает система течений, в которой преобладает направление переноса против ветра.

Л и т е р а т у р а

1. <http://www.vedu.ru/BigEncDic>.
2. <http://www.jankoy.org.ua/page.php?al=bakalsk>.
3. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Савицкий Р.М. Экологический мониторинг и оценка воздействия разливов нефтепродуктов в Керченском проливе. Аварии судов в ноябре 2007 г. – Ростов-на-Дону: Издательство ЮНЦ РАН. 2008. – 79 с.
4. Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model, in Three-Dimensional Coast Ocean Models. Coastal and Estuarine Science, vol. 4. 1987. – P. 1–16.
5. Hsu S.A. A mechanism for the increase of wind stress coefficient with wind speed over water surface: A parametric model. Journal of Physical Oceanography, vol. 16. 1986. – P. 144–150.
6. <http://forecast.uoa.gr>.