

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КРАЕВЫХ УСЛОВИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

С.Г. Демышев, Н.А. Евстигнеева

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

Приведены результаты двух численных расчетов баротропных течений на северо-западном шельфе Черного моря. На открытой части боковых границ для уравнений движения задаются условия Дирихле. В первом варианте действие ветра не учитывается, во втором – на поверхности задается климатический ветер. Получена пространственно-временная структура полей уровня, горизонтальной скорости течений, проведено сопоставление результатов двух экспериментов.

Введение. В работах [1, 2] с помощью многослойной изопикнической модели рассчитываются гидрофизические поля в северо-западной части Черного моря, на основании адаптационных расчетов по среднемесячным климатическим данным для каждого месяца получены и проанализированы распределения течений. На открытой части боковых границ для уравнений движения задавались условия свободного протекания.

Целью данной работы является модификация гидродинамической модели МГИ НАН Украины [3] для расчета климатических течений на шельфе Черного моря, батиметрия которого представлена на рисунке 1, проведение на ее основе экспериментов с различными типами краевых условий и анализ их результатов. Изучается роль краевых условий и учета воздействия климатического ветра в формировании течений в северо-западной части Черного моря.

Постановка задачи. Уравнения модели в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды имеют вид:

$$\begin{aligned} u_t - (\xi + f)v + wu_z &= -g\xi_x - E_x + (v_V u_z)_z + F^u, \\ v_t + (\xi + f)u + wv_z &= -g\xi_y - E_y + (v_V v_z)_z + F^v, \\ u_x + v_y + w_z &= 0, \end{aligned}$$

$$\xi_t + \int_0^H (u_x + v_y) dz = 0, \quad (1)$$

где $E = \frac{u^2 + v^2}{2}; \quad \xi = v_x - u_y.$

Используется бигармоническое представление турбулентных слагаемых в уравнениях движения:

$$F^u = -v_H \nabla^4 u; \quad F^v = -v_H \nabla^4 v.$$

Уравнение (1) эквивалентно заданию линеаризованного кинематического условия на поверхности моря $w = -\xi$ (при $z = 0$).

Уравнения для u, v аппроксимировались по времени схемой центральных разностей («leap-frog») с периодическим использованием схемы Матсuno.

Краевые условия на поверхности имеют вид $v_V u_z = -\tau^x, \quad v_V v_z = -\tau^y$ или без учета действия ветра $v_V u_z = 0, \quad v_V v_z = 0$.

На дне выполняются условия прилипания $u = v = w = 0$.

На твердых боковых стенках используются следующие условия:

для меридиональных участков границы

$$u = \nabla^2 u = v_x = \nabla^2 v_x = 0,$$

для зональных участков границы

$$v = \nabla^2 v = u_y = \nabla^2 u_y = 0.$$

В качестве условий на жидкой границе используются интерполированные на мелкую сетку данные расчетов на крупной сетке, полученные для каждого расчетного времени:

$$\begin{aligned} u|_T &= u^g, \quad \nabla^2 u = v_x = \nabla^2 v_x = 0, \\ v|_T &= v^g, \quad \nabla^2 v = u_y = \nabla^2 u_y = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

При $t = t_0 \quad u = v = 0, \quad \xi = 0$.

Численные эксперименты проводились с разрешением по оси $x = 1,66$ км, по оси $y = 1,56$ км. По вертикали уровень моря и горизонтальная скорость течений рассчитывались на 44 горизонтах: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32; 34; 35; 37; 39; 41; 43; 45; 47; 49 м. Вертикальная компонента скорости вычислялась между горизонтами.

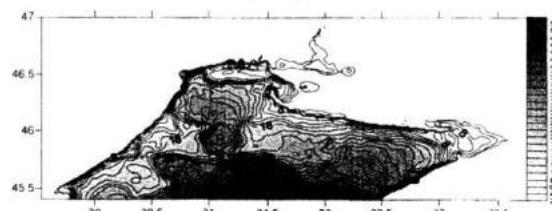


Рисунок 1 – Батиметрия северо-западного шельфа Черного моря (м)

Коэффициенты турбулентной вязкости по горизонтали и вертикали принимают значения $v_H = 5 \cdot 10^3 \text{ см}^4/\text{с}$, $v_V = 5 \text{ см}^2/\text{с}$. Шаг по времени в модели выбран 2 мин. Время интегрирования два года.

Влияние рек на циркуляцию учитывается заданием распределенных и точечных источников воды с заданными скоростями. При расчетах учитывался сток трех рек – Днепра, Днестра и Южного Буга. Использовались следующие значения расходов рек за год: $38,88 \text{ км}^3$ – Днепр, $7,65 \text{ км}^3$ – Днестр, $2,8 \text{ км}^3$ – Южный Буг.

Описание численных экспериментов. В первом варианте действие ветра не учитывается, во втором – на поверхности задается климатический ветер.

Расчет течений по модели для всего моря позволяет иметь краевые условия на открытой границе для шельфовой части моря. Полученные значения горизонтальной скорости для жидкой границы для квазистационарного режима были линейно пропорциональны на выбранную сетку.

В обоих случаях на открытой части боковых границ для уравнений движения задавались условия (2).

На рисунке 2 представлен график поведения со временем средней по объему кинетической энергии в течение двух лет для первого эксперимента.

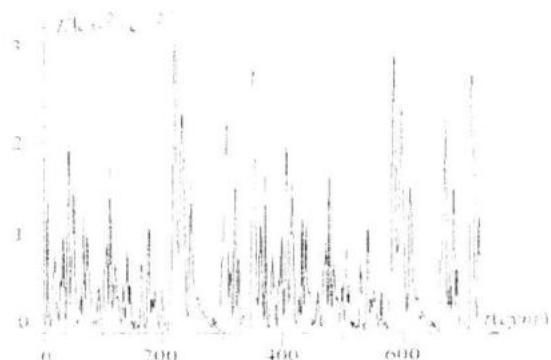


Рисунок 2 – Изменение со временем средней по объему кинетической энергии (действие ветра не учитывается)

Значения средней по объему кинетической энергии не превышают $3,03 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-2}$. Этот максимум достигается на 219 расчетные сутки (21 июня).

На рисунке 3 представлены график поведения со временем средней по объему кинетической энергии в течение двух лет для второго эксперимента.

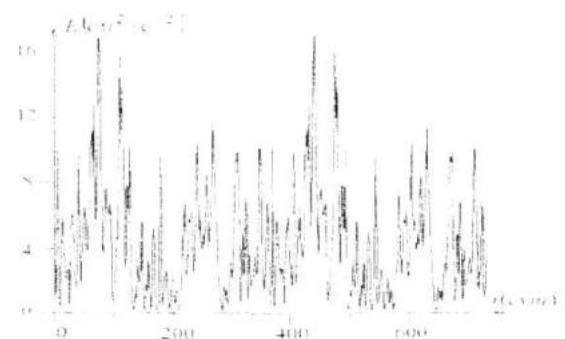


Рисунок 3 – Изменение со временем средней по объему кинетической энергии (на поверхности задается климатический ветер)

Значения средней по объему кинетической энергии не превышают $17,06 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-2}$. Этот максимум достигается на 76 расчетные сутки (29 января).

Сравним поля уровня, рассчитанные по модели Черного моря с шагом 5 км для области северо-западного шельфа, с результатами двух экспериментов на 17 декабря, представленных на рисунках 4 – 6.



Рисунок 4 – Поле уровня, рассчитанное по модели Черного моря с шагом по пространственным переменным 5 км на 17 декабря

Существенную роль в формировании поля уровня, как видно из рисунка, играет рельеф дна. Отклонения свободной поверхности от невозмущенного уровня не превышают 3,4 см.



Рисунок 5 – Поле уровня, рассчитанное по модели с шагом ~1,6 км на 17 декабря (действие ветра не учитывается)

При задании на жидкой границе условий (2) отклонения свободной поверхности от невозмущенного уровня не превосходят 1,6 см.

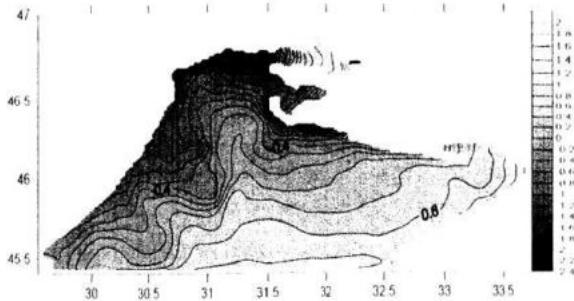


Рисунок 6 – Поле уровня, рассчитанное по модели с шагом $\sim 1,6$ км на 17 декабря (на поверхности задается климатический ветер)

Очевидно, что учет действия ветра на поверхности моря оказывает преобладающее влияние на формирование поля уровня.

Сравним поля горизонтальной скорости течений, рассчитанные по модели Черного моря с шагом по пространственным переменным 5 км для северо-западного шельфа, с результатами двух экспериментов на 17 декабря, представленных на рисунках 7 – 9.

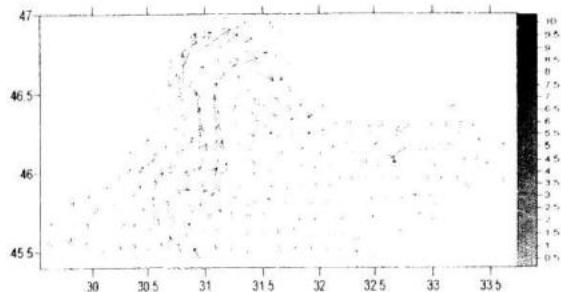


Рисунок 7 – Поле горизонтальной скорости течений, рассчитанное по модели Черного моря с шагом 5 км на 17 декабря

Скорости течений, как видно из рисунка, не превышают 10 см/с. На мелководье наблюдается усиление течений.

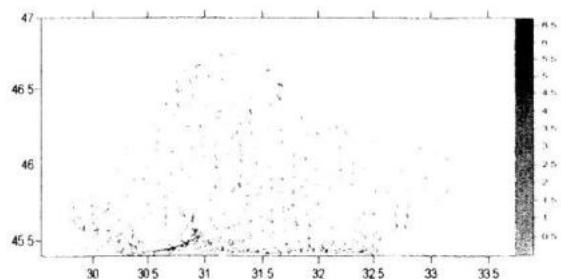


Рисунок 8 – Поле течений, рассчитанное с шагом $\sim 1,6$ км на глубине 10 м на 17 декабря (действие ветра не учитывается)

Задание на жидкой границе условий (2) позволяет более точно воспроизвести течения в приграничной области. В остальных районах моря скорости течений не превышают 2 см/с.

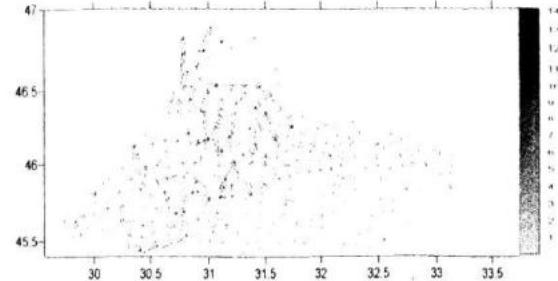


Рисунок 9 – Поле течений, рассчитанное с шагом $\sim 1,6$ км на глубине 10 м на 17 декабря (на поверхности задается климатический ветер)

Анализируя результаты этого эксперимента, отметим некоторое усиление течений по сравнению с рисунком 7.

Аналогично проведено сравнение полей уровня и горизонтальной скорости течений для остальных месяцев. Получено, что картина течений определяется в преобладающей степени ветровым воздействием.

Заключение. Трехмерная нелинейная модель Черного моря адаптирована для района северо-западного шельфа в баротропном варианте.

Учет действия ветра на поверхности моря оказывает преобладающее влияние на формирование климатической циркуляции в северо-западной части Черного моря по сравнению с условиями на жидкой границе. Течения в приграничной области воспроизводятся более точно при задании на жидкой границе условий (2).

Л и т е р а т у р а

1. Иванов В.А., Рябцев Ю.Н. Анализ течений на северо-западном шельфе Черного моря. – Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2002. – Вып. 1(16). – С. 8 – 21.

2. Алаев В.Г. Исследование сезонной изменчивости гидродинамических полей в северо-западной части Черного моря на основе изопикнической модели // Морской гидрофизический журнал. – 2000. – № 6. – С. 5 – 17.

3. Демышев С.Г., Коротаев Г.К. Численная энергосбалансированная модель бароклинических течений океана на сетке С. – Численные модели и результаты калибровочных расчетов течений в Атлантическом океане. – М.: Изд. ИВМ, 1992. – С. 163 – 231.