

**ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО
МОДЕЛИРОВАНИЮ
ВЕРТИКАЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ В
МРАМОРНОМ МОРЕ С УЧЕТОМ
ПРОЛИВОВ БОСФОР И
ДАРДАНЕЛЛЫ**

С.Г. Демышев, С.В. Довгая

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

В работе проводится анализ вертикальной скорости, рассчитанной по численной нелинейной гидродинамической модели циркуляции вод Мраморного моря. Анализируются распределения этой характеристики на разных глубинах. Показано, что структура полей вертикальных движений адекватно отражает основные черты горизонтальной циркуляции вод Мраморного моря.

Мраморное море является буферным между Черным и Средиземным морями. Поэтому адекватное моделирование циркуляции в Мраморном море позволит правильно воспроизвести характеристики поступающих вод в проливы Босфор и Дарданеллы и, следовательно, в Черное и Средиземное моря.

Система уравнений модели в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды имеет вид:

$$u_t - (\xi + f)v + wu_z = -g\xi_x - \frac{1}{\rho_0} (P' + E)_x + v_V u_{zz} + v_H \nabla^2 u, \quad (1)$$

$$v_t + (\xi + f)u + wv_z = -g\xi_y - \frac{1}{\rho_0} (P' + E)_y + v_V v_{zz} + v_H \nabla^2 v, \quad (2)$$

$$u_x + v_y + w_z = 0, \quad (3)$$

$$\xi_t + \int_0^H (u_x + v_y) dz = 0, \quad (4)$$

$$P = g\rho_0 \zeta + g \int_0^z \rho d\mu = g\rho_0 \zeta + P', \quad (5)$$

$$T_t + (uT)_x + (vT)_y + (wT)_z = \kappa^H \nabla^2 T + \kappa^V T_{zz}, \quad (6)$$

$$S_t + (uS)_x + (vS)_y + (wS)_z = \kappa^H \nabla^2 S + \kappa^V S_{zz}, \quad (7)$$

$$\rho = \rho_0 + \alpha_1^T T + \alpha_1^S S + \alpha_2^T T^2 + \alpha^{ST} ST, \quad (8)$$

$$\text{где } E = \rho_0 \frac{u^2 + v^2}{2}; \quad \xi = v_x - u_y.$$

Уравнение (4) эквивалентно заданию линеаризованного кинематического условия на поверхности моря ($w = -\zeta_t$).

Граничные и начальные условия имеют следующий вид.

На поверхности при $z = 0$ имеем

$$v_V u_z = v_V v_z = \kappa^V T_z = \kappa^V S_z = 0. \quad (9)$$

На дне при $z = H(x, y)$:

$$u = v = w = 0, \quad T_z = S_z = 0. \quad (10)$$

На твердых боковых стенках:

для меридиональных участков границы

$$u = v_x = 0, \quad T_x = 0, \quad S_x = 0, \quad (11)$$

для зональных

$$v = u_y = 0, \quad T_y = S_y = 0. \quad (12)$$

Для верхнебосфорского течения и нижнего течения Дарданелл используются следующие условия (на втоке):

для меридиональных участков

$$u = u^s, \quad v_x = 0, \quad T = T^s, \quad S = S^s, \quad (13)$$

для зональных

$$v = v^s, \quad u_y = 0, \quad T = T^s, \quad S = S^s. \quad (14)$$

Для нижнебосфорского течения и верхнего течения Дарданелл условия на вытоке следующие:

для меридиональных участков

$$u = u^s, \quad v_x = 0, \quad T_x = S_x = 0, \quad (15)$$

для зональных

$$v = v^s, \quad u_y = 0, \quad T_y = S_y = 0. \quad (16)$$

Введены обозначения: u^s, v^s – скорость, T^s, S^s – температура и соленость в проливах.

При $t = t_0$

$$u = v = 0, \quad \zeta = 0, \quad T = T^0(x, y, z), \\ S = S^0(x, y, z).$$

На основе численной модели (1) – (16) проведен прогностический эксперимент по формированию циркуляции в Мраморном море с учетом скорости течения, температуры и солености в проливах (13) – (16). Расчет проводился при разрешении по горизонтали по оси $x = 3.66$ км, по оси $y = 2.5$ км. По вертикали использовалось 18 го-

ризонтов: 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 62.50, 75, 100, 150, 300, 500, 700, 900, 1100 м. Коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии по горизонтали и вертикали принимали, соответственно, следующие значения:

$$\nu_H = 10^6; \kappa^H = 5 \cdot 10^5;$$

$$\nu_V = 5; \kappa^V = 0.03 \text{ см}^2/\text{с}^{-1}.$$

Шаг по времени в модели составлял 2.5 мин.

Скорости в Босфоре и Дарданеллах задавались постоянными по времени из расчета 650 км³/год в верхнебосфорском течении, 350 км³/год в нижнебосфорском, 830 км³/год в верхнем течении и 530 км³/год в нижнем в Дарданеллах [1]. При задании температуры в верхнебосфорском течении учитывалась сезонная изменчивость. Значения температуры, начиная с января, следующие: 11.2, 7.0, 7.1, 10.8, 14.3, 18.0, 22.1, 23.5, 20.3, 16.2, 15.3, 12.2 °C [1]. Соленость равнялась 21 %. В нижнем течении в Дарданеллах, согласно доступным данным измерений, соленость изменялась от 36 % до 38.68 % на глубинах 25 – 63 м, температура была равна 14.6 °C [2].

В качестве начальных полей для T и S задавались климатические поля температуры и солености, построенные на основе данных измерений, имеющихся в базе данных МГИ НАН Украины для июля. Ниже 30 м все имеющиеся данные наблюдений на данном горизонте в этот сезон усреднялись, и начальная температура и соленость не зависели от горизонтальных координат. Уровень моря и горизонтальные скорости на начальный момент времени полагались равными нулю. Предполагалось также, что на поверхности моря потоки импульса, тепла и соли равны нулю. Время интегрирования уравнений модели составило 19980 суток (≈ 55 лет).

На рисунках 1, 3, 5, 7 для Мраморного моря на конечный момент времени интегрирования (19980 сутки) представлены карты распределения вертикальной скорости на разных горизонтах, а на рисунках 2, 4, 6, 8 – скорости течений на соответствующих глубинах.

На поверхности моря качественно структура пространственного распределения климатической вертикальной скорости

(см. рисунок 1) характеризуется наличием относительно больших чередующихся зон подъема и опускания вод. Так в области

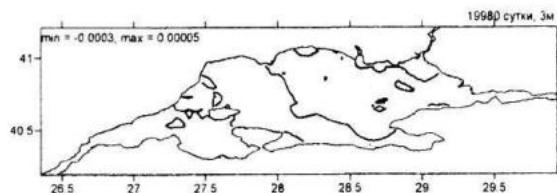


Рисунок 1 – Вертикальная скорость (см/с) на горизонте 3 м (области опускания темнее)

вхождения верхнебосфорского течения происходит подъем вод. Далее большую часть центральной и восточной областей моря, а также придарданельскую занимают зоны опускания. Отмеченные области вертикальных движений характеризуются вытянутостью в зональном направлении, что соответствует направлению распространения струйного S-образного течения (см. рисунок 2), следующего от пролива Босфор к проливу Дарданеллы.

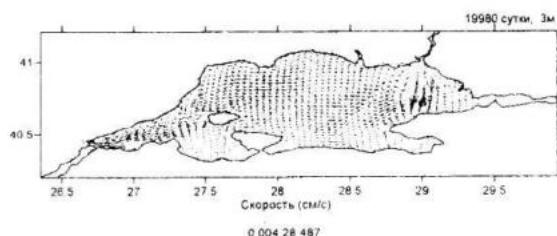


Рисунок 2 – Скорость течений на горизонте 3 м

С увеличением глубины структура полей W представляет собой более пеструю картину (см. рисунок 3). При этом череду-

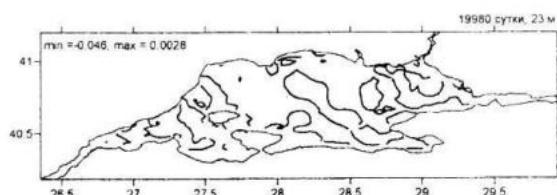


Рисунок 3 – Вертикальная скорость (см/с) на горизонте 23 м (области опускания темнее)

ющиеся зоны положительных и отрицательных значений W в западной и восточной частях моря соответствуют антициклоническим образованиям на этих глубинах (см. рисунок 4).

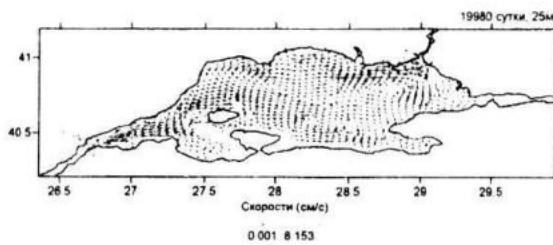


Рисунок 4 – Скорость течений на горизонте 25 м

На горизонте 35 м, как видно из рисунка 5, структура W в центральной части моря соответствует циклоническому вращению вод.

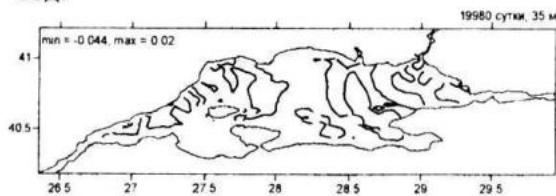


Рисунок 5 – Вертикальная скорость (см/с) на горизонте 35 м (области опускания темнее)

Это хорошо согласуется с видом горизонтальной циркуляции, как следует из рисунка 6.

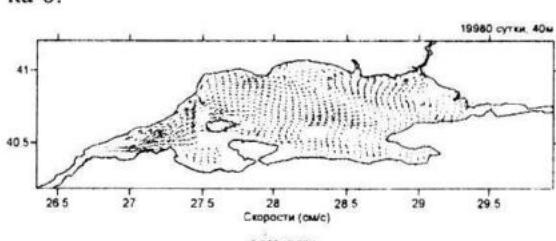


Рисунок 6 – Скорость течений на горизонте 40 м

На остальных горизонтах до 88 м качественно структура распределения W похожа на карту рисунка 5. В слое 100 – 400 м (см. рисунок 7) заметно усиливается перемежаемость зон подъема и опускания вод, так как в центральной части моря сформировались два циклонических вихря, а на западе и востоке образовались антициклонические круговороты (см. рисунок 8).

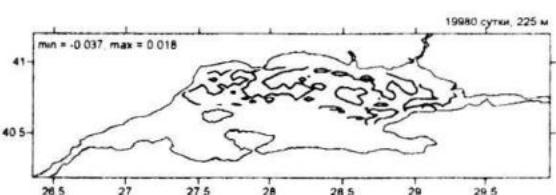


Рисунок 7 – Вертикальная скорость (см/с) на горизонте 225 м (области опускания темнее)

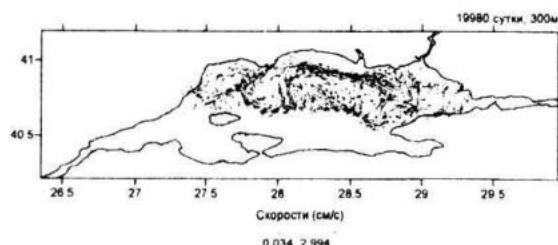


Рисунок 8 – Скорость течений на горизонте 300 м

На горизонтах ниже 400 м в поле W наблюдаются мелкомасштабные особенности (см. рисунок 9).

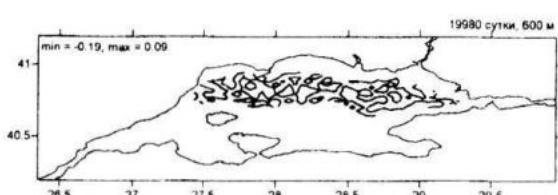


Рисунок 9 – Вертикальная скорость (см/с) на горизонте 600 м (области опускания темнее)

Следуя [3], заметим, что этот эффект может быть связан с грубым разрешением по вертикали в глубинных слоях моря.

Таким образом, трехмерная нелинейная гидродинамическая модель позволяет получить климатическое поле вертикальных движений в Мраморном море, которое отражает основные черты горизонтальной циркуляции вод.

Л и т е р а т у р а

1. Surku T.Besiktepe, Halil I.Sur, Emin Ozsoy at all. The circulation and hydrography of the Marmara Sea . Prog.Oceanog., vol. 34. 1994. – P. 285 – 334.
2. T.S. Besiktepe. Density currents in the two-layer flow: an example of Dardanelles outflow . Oceanol. Acta, vol. 26. 2003. – P. 243 – 253.
3. С.Г. Демышев. Численные эксперименты по моделированию вертикальных движений в Черном море при постоянной плотности. Морской гидрофизический журнал. – № 1 – 2003. – С. 58 – 66.