

**ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЙ В
ВЕРХНЕМ СЛОЕ
МРАМОРНОГО МОРЯ**

С.Г. Демьяшев, С.В. Довгая

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

В работе проводится анализ течений в верхнем слое Мраморного моря, полученных на основе численных экспериментов. Проведено два расчета, отличающихся пространственным разрешением. Изучены особенности в поле уровня и горизонтальных скоростей. Показано, что структура скорости соответствует S-образному струйному течению. На севере моря в летний период образуется циклонический круговорот.

Турецкая проливная система, в которую принято объединять проливы Босфор, Дарданеллы и Мраморное море, является важным элементом, определяющим гидрологию Черного и Эгейского морей. Поэтому представляется важным изучение гидрофизических характеристик Мраморного моря.

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

$$u_t - (\xi + f)v + wu_z = -g\zeta_x - \frac{1}{\rho_0}(P' + E)_x + v_V u_{zz} - v_H \nabla^4 u, \quad (1)$$

$$v_t + (\xi + f)u + wv_z = -g\zeta_y - \frac{1}{\rho_0}(P' + E)_y + v_V v_{zz} - v_H \nabla^4 v, \quad (2)$$

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

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

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

$$T_t + (uT)_x + (vT)_y + (wT)_z = -\kappa^H \nabla^4 T + \kappa^V T_{zz}, \quad (6)$$

$$S_t + (uS)_x + (vS)_y + (wS)_z = -\kappa^H \nabla^4 S + \kappa^V S_{zz}, \quad (7)$$

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

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

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

$$u = \nabla^2 u = v_x = \nabla^2 v_x = 0, \quad T_x = (\nabla^2 T)_x = S_x = (\nabla^2 S)_x = 0. \quad (11)$$

для зональных

$$v = \nabla^2 v = u_y = \nabla^2 u_y = 0, \quad T_y = (\nabla^2 T)_y = S_y = (\nabla^2 S)_y = 0. \quad (12)$$

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

для меридиональных участков

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

$$v_x = \nabla^2 v_x = 0, \quad (\nabla^2 T)_x = (\nabla^2 S)_x = 0,$$

для зональных

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

$$u_y = \nabla^2 u_y = 0, \quad (\nabla^2 T)_y = (\nabla^2 S)_y = 0.$$

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

для меридиональных участков

$$u = u^s, \quad v_x = \nabla^2 v_x = 0, \quad (15)$$

$$T_x = (\nabla^2 T)_x = S_x = (\nabla^2 S)_x = 0,$$

для зональных

$$v = v^s, \quad u_y = \nabla^2 u_y = 0,$$

$$T_y = (\nabla^2 T)_y = S_y = (\nabla^2 S)_y = 0. \quad (16)$$

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

В начальный момент времени ($t = t_0$)

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

На основе численной модели (1) – (16) проведены два прогностических эксперимента по формированию циркуляции в Мраморном море с учетом скорости течений, температуры и солености в проливах (13) – (16). Эксперименты отличались разрешением по горизонтали. В первом шаге составляли, соответственно, по оси x – 3.66 км, по оси y – 2.5 км [3], во втором – по оси x – 1.22 км, по оси y – 0.83 км. По вертикали использовалось 18 горизонтов: 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:

$$v_H = 5 \cdot 10^{14}; \quad \kappa^H = 5 \cdot 10^{14}; \\ v_V = 5; \quad \kappa^V = 0.03 \text{ см}^2 / \text{с}^{-1}.$$

Шаг по времени в модели в I эксперименте составлял 2.5 мин., во II-м – 0.5 мин.

Скорости в Босфоре и Дарданеллах задавались постоянными по времени из расчета $650 \text{ км}^3/\text{год}$ в верхнебосфорском течении, $350 \text{ км}^3/\text{год}$ в нижнебосфорском, $830 \text{ км}^3/\text{год}$ в верхнем течении и $530 \text{ км}^3/\text{год}$ в нижнем в Дарданеллах [1]. Глубина слоев в проливах была принята следующей: в верхнем течении Босфора – 0 – 22.5 м, в нижнем – 22.5 – 87.5 м; в верхнем течении Дарданелл – 0 – 22.5 м, в нижнем – 22.5 – 68.75 м. При задании температуры в верхнебосфорском течении от поверхности моря до глубины 22.5 м учитывалась сезонная изменчивость. При этом значения температуры варьировались в пределах от 8 до 23.5°C [1]. Соленость с глубиной изменялась от 21 до 30 ‰. В нижнем течении Дарданелл S принимала значения от 36 до 38.68 ‰ на глубинах 22.5 – 68.75 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 в начальный момент времени полагались равными нулю. Предполагалось также, что на поверхности моря потоки импульса, тепла и соли равны нулю. Время интегрирования уравнений модели составило 2120 суток (≈ 5.8 лет).

В I эксперименте [3] в верхнем слое наблюдался поток от пролива Босфор к проливу Дарданеллы, охватывающий практически все море (см. рисунок 1). В восточной части бассейна в районе залива Измид сформировался циклонический вихрь. Такая картина циркуляции наблюдалась в течение всего периода интегрирования.

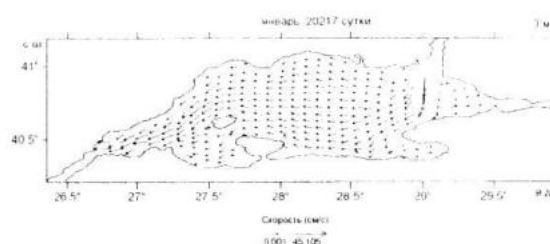


Рисунок 1 – Скорость течений (см/с) в январе на горизонте 3 м (I эксперимент)

Во втором расчете (с высоким пространственным разрешением (см. рисунок 2)) в северо-восточной половине бассейна сформировался и постоянно присутствует антициклонический круговорот, что соответствует наблюдениям [1]. В виде единого круговорота он наблюдается до глубины 30 м.

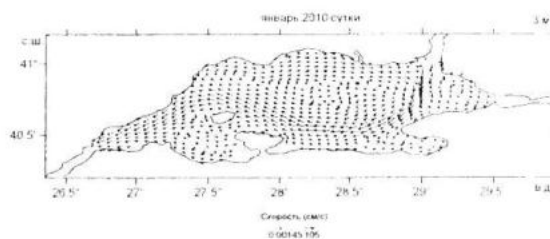


Рисунок 2 – Скорость течений (см/с) в январе на горизонте 3 м (II эксперимент)

От пролива Босфор к проливу Дарданеллы распространяется узкое струйное течение, скорости в котором достигают 45 см/с . В северной части бассейна периодически образуется циклонический вихрь (см. рисунок 3), время жизни которого составляет примерно 230 суток. Он формируется в марте и существует до ноября.



Рисунок 3 – Скорость течений (см/с) в августе на горизонте 3 м (II эксперимент)

Его диаметр составляет примерно 50 км. На карте, построенной по натурным данным [1] (см. рисунок 4), циклонический вихрь

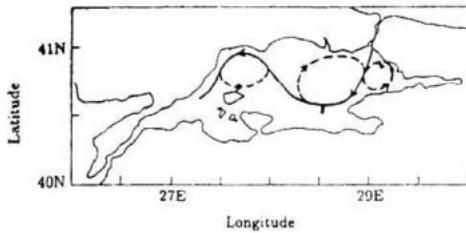


Рисунок 4 – Схематическое изображение циркуляции вод верхнего слоя Мраморного моря, построенное по данным, собранным в период 1987-1992 гг.

приблизительно такого же размера находится западнее. В районе залива Измид в поле уровня большую часть года наблюдается антициклонический вихрь. Он прослеживается до глубины примерно 15 м. В летний период в этом районе в слое 0 – 22.5 м наблюдается циклоническое вращение вод (см. рисунок 5).



Рисунок 5 – Скорость течений (см/с) в августе на горизонте 10 м (II эксперимент)

На глубине 20 м в первом эксперименте на протяжении всего года в северной части бассейна наблюдается антициклоническое образование (см. рисунок 6). Как видно из рисунка 7, во втором расчете структура течений носит более сложный характер. Вся центральная часть моря охвачена антициклоническим круговоротом, в восточной

части бассейна сформировались циклонический и антициклонический вихри.

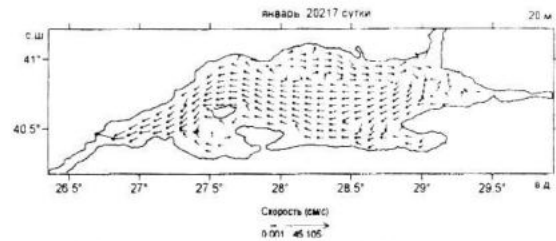


Рисунок 6 – Скорость течений (см/с) в январе на горизонте 20 м (I эксперимент)

Сезонная изменчивость в поле течений проявляется до глубины 20 м.

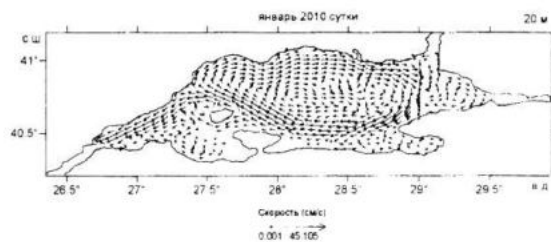


Рисунок 7 – Скорость течений (см/с) в январе на горизонте 20 м (II эксперимент)

Проведенные численные прогностические эксперименты показали, что в результате влияния проливов Босфор и Дарданеллы в верхнем слое моря формируется S – образное струйное течение. Оно является периферией антициклонического круговорота. Около северной границы моря периодически образуется циклонический вихрь. Полученные особенности подтверждаются данными наблюдений [1].

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, С.В. Довгая. Численный эксперимент по моделированию гидрофизических полей Мраморного моря с учетом проливов Босфор и Дарданеллы. Морской гидрофизический журнал. – № 3 – 2007. – С. 28 – 41.