

СТРУКТУРА ТЕРМОХАЛИННЫХ ПОЛЕЙ ВОД МРАМОРНОГО МОРЯ

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 полей температуры и солености, полученных на основе проведенных расчетов по численной нелинейной гидродинамической модели циркуляции вод Мраморного моря. Анализируются распределения этих характеристик на разных горизонтах. Показано, что раздел двух водных масс моря имеет место на глубинах 20–40 м, при этом перепад солености достигает 9 ‰.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Граничные и начальные условия принимают следующий вид. На поверхности при $z = 0$ имеем

$$v_V u_z = v_V v_z = 0, \quad (9)$$

$$\kappa^V T_z = 0, \quad \kappa^V S_z = 0.$$

На дне при $z = H(x, y)$:

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

На твердых боковых стенках: для меридиональных участков границы

$$u = 0, \quad \nabla^2 u = 0, \quad v_x = 0, \quad \nabla^2 v_x = 0, \quad (11)$$

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

$$S_x = 0, \quad (\nabla^2 S)_x = 0;$$

для зональных

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

$$T_y = 0, \quad (\nabla^2 T)_y = 0, \quad (12)$$

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

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

$$u = u^s, \quad T = T^s, \quad S = S^s,$$

$$v_x = 0, \quad \nabla^2 v_x = 0, \quad (13)$$

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

для зональных

$$v = v^s, \quad T = T^s, \quad S = S^s,$$

$$u_y = 0, \quad \nabla^2 u_y = 0, \quad (14)$$

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

Для нижнебосфорского течения и верхнего течения Дарданелл условия на выходе следующие: для меридиональных участков

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

$$T_x = 0, \quad (\nabla^2 T)_x = 0, \quad (15)$$

$$S_x = 0, \quad (\nabla^2 S)_x = 0;$$

для зональных

$$\begin{aligned} v = v^s, u_y = 0, \nabla^2 u_y = 0, \\ T_y = 0, (\nabla^2 T)_y = 0, \\ S_y = 0, (\nabla^2 S)_y = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

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

В начальный момент времени ($t = t_0$) задаются следующие условия:

$$\begin{aligned} u = v = 0, \quad \zeta = 0, \quad T = T^0(x, y, z), \\ S = S^0(x, y, z). \end{aligned}$$

На основе численной модели (1) – (16) проведен прогностический эксперимент по формированию циркуляции в Мраморном море с учетом скорости течений, температуры и солености в проливах (13) – (16). Шаги составляли, соответственно, 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; 62,5; 75; 100; 150; 300; 500; 700; 900; 1100 м. Коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии по горизонтали и вертикали принимали, соответственно, следующие значения:

$$\begin{aligned} \nu_H = 5 \cdot 10^{14}; \quad \kappa^H = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^4 / \text{с}^{-1}; \\ \nu_V = 5; \quad \kappa^V = 0,03 \text{ см}^2 / \text{с}^{-1}. \end{aligned}$$

Шаг по времени в модели составлял 0,5 мин.

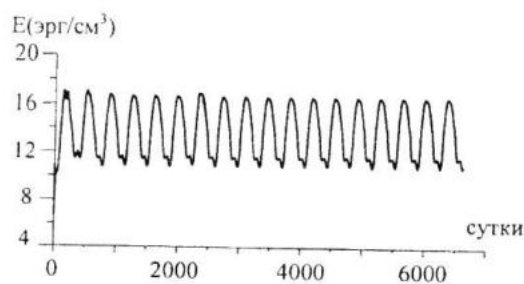
Скорости в Босфоре и Дарданеллах задавались постоянными по времени из расчета $650 \text{ км}^3/\text{год}$ в верхнебосфорском течении, $350 \text{ км}^3/\text{год}$ в нижнебосфорском, $830 \text{ км}^3/\text{год}$ в верхнем течении и $530 \text{ км}^3/\text{год}$ в нижнем в Дарданеллах [1]. Глубина 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 $23,5 \text{ }^\circ\text{C}$ [1]. Соленость с глубиной изменялась от 21 до 30 ‰. В нижнем тече-

нии Дарданелл S принимала значения от 36 до 38,68 ‰ на глубинах 22,5 – 68,75 м, температура была равна $14,6 \text{ }^\circ\text{C}$ [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 6620 суток (≈ 18 лет).

Для анализа поведения со временем полей температуры и солености рассчитывались средние по объему и средние по горизонтам кинетическая энергия, соленость и температура.

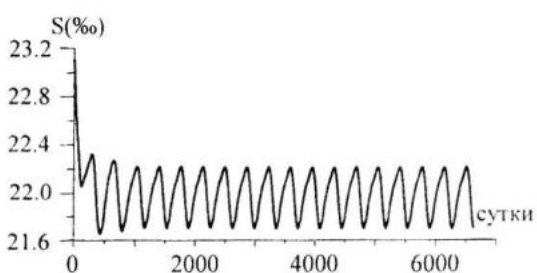
В начальный период времени происходили процессы приспособления поля скорости к полю плотности и поля плотности к геометрии области и краевым условиям. Первый процесс (геострофическое приспособление) происходит довольно быстро – примерно за 50 суток, второй – более медленно, он продолжается, примерно, в течении 1000 суток. Поведение средней по объему кинетической энергии демонстрирует эти особенности. В верхнем 20-метровом слое установление происходит быстро. В качестве примера на рис. 1 представлен график изменения средней кинетической энергии на глубине 10 м.



Р и с. 1. График поведения со временем средней по горизонту 10 м кинетической энергии

Он демонстрирует, что после двух месяцев интегрирования наступает периодический режим. Ниже верхнего слоя процесс приспособления проходит более медленно. Так, периодическое поведение средней энергии на горизонте 100 м имеет место после 500 суток.

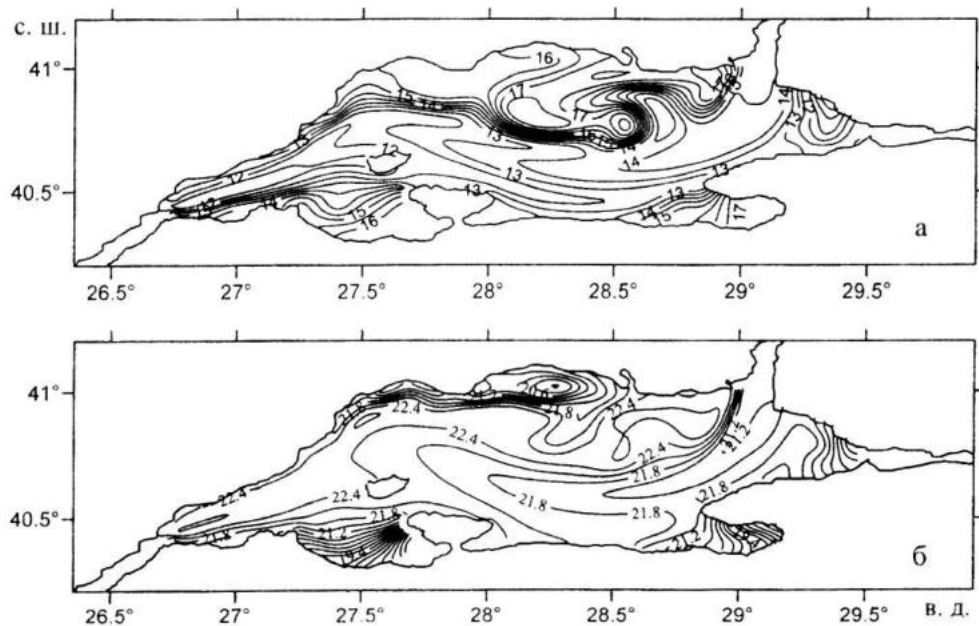
Такое поведение обусловлено временем приспособления поля солености к физико-географическим условиям Мраморного моря. Средние пространственные характеристики S хорошо соответствуют поведению энергии – быстро устанавливается периодический режим в верхнем слое (рис. 2) и более медленно – в нижних слоях.



Р и с. 2. График поведения со временем средней по горизонту 10 м солености

Рассмотрим распределение термохалинных характеристик вод Мраморного моря, полученных в результате проведенного численного эксперимента. В поведении температуры наблюдается

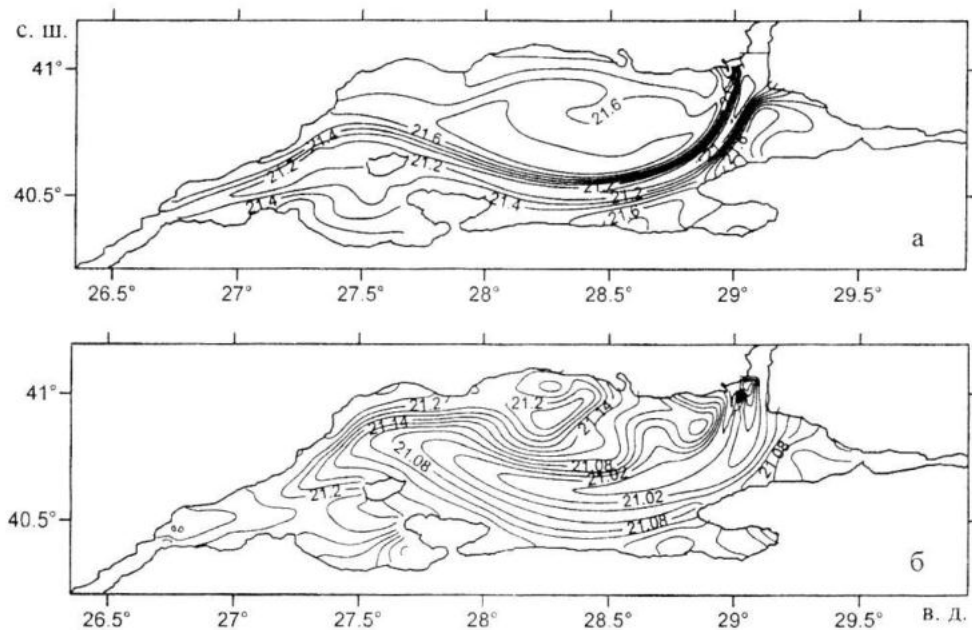
незначительная сезонная изменчивость. В результате втока холодной воды из Босфорского пролива в зимний сезон в поле температуры в центральной части моря формируется узкая фронтальная зона, которая соответствует S -течению и отделяет более теплые воды на севере и юге бассейна. При последующем потеплении босфорской воды ширина фронтальной зоны увеличивается, течение приобретает более гладкую структуру и к маю месяцу (рис. 3 а) оно представляет собой широкий поток от Босфора до Дарданелл, охватывающий большую часть моря. Поступление более теплой воды в весенний сезон в северо-западной области моря приводит к тому, что часть фронтальной зоны, где вода остается более холодной, оттесняется к северу. В результате на севере моря формируется область с повышенной плотностью (рис. 3 б), соответствующая циклоническому вихрю, в котором температура воды на $1,5^{\circ}\text{C}$ меньше температуры окружающей воды. Время жизни этой особенности составляет примерно 230 суток. Такая структура в поле температуры характерна до глубины 20 м. Сезонная изменчивость также прослеживается до этой глубины. На глубине 25 м наблюдается поступление вод с Эгейского моря. При этом перепад температуры воды по всей площади моря на данном горизонте составляет $0,6^{\circ}\text{C}$. Ниже поля температуры со временем меняются незначительно.



Р и с. 3. Поля температуры вод бассейна на горизонте 3 м в мае (а) и сентябре (б)

Рассмотрим далее распределение халинных полей моря. В верхнем слое структура поля солёности определяется втоком менее солёных вод из Босфорского пролива и вытоком мраморноморских вод через Дарданеллы. Заметим, что солёность входящей верхнебосфорской воды задается изменяющейся по глубине и, в отличие от температуры, постоянна во времени. Тем не менее, изменчивость во времени поля солёности в верхнем 20-метровом слое анало-

гична поведению температуры. В зимний сезон (рис. 4 а) в центральной части моря наблюдается узкая полоса вод с пониженной солёностью, разделяющая более солёные воды на севере и юге бассейна. В дальнейшем солёность северных и южных вод начинает увеличиваться, они оттесняются менее солёными водами, и в результате в северо-западной части моря формируется область вод повышенной солёности (рис. 4 б), соответствующая циклоническому круговороту.



Р и с. 4. Поля солёности вод бассейна на горизонте 3м в феврале (а) и сентябре (б)

С увеличением глубины воды Мраморного моря в результате подъема и последующего горизонтального перемешивания становятся более солёными. Солёность вод лежащих на глубине 25 м и ниже преимущественно определяются характеристиками вод входящих с Егейского моря. Так на горизонте 25 м в придарданельской области солёность вод достигает 37 ‰, а в прибосфорской – 36,8 ‰. Распределение же солёности по вертикали вдоль главной оси моря может служить иллюстрацией двухслойной структуры вод бассейна. При этом раздел двух водных масс с различной солёностью имеет место на глубинах 20–40 м, и её перепад (ΔS) составляет около 9 ‰.

Таким образом, в результате проведенного численного расчета получены основные закономерности в структурах термохалинных полей изучаемого бассейна, которые соответствуют многолетним экспериментальным наблюдениям, проводимым в этом регионе [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Surku T. Besiktepe, Halil I. Sur, Emin Ozsoy at all. The circulation and hydrography of the Marmara Sea // Prog. Oceanog. – 1994. – 34. – P. 285 – 334.
2. Besiktepe T.S. Density currents in the two-layer flow: an example of Dardanelles outflow // Oceanol. Acta. – 2003. – 26. – P. 243 – 253.