

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ВОД
МРАМОРНОГО МОРЯ С УЧЕТОМ
ВЕТРОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

С.Г. Демьшев, С.В. Довгая

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

На основе численной модели циркуляции проведен длительный (20 лет) эксперимент по формированию гидродинамической структуры вод Мраморного моря под влиянием обмена через проливы с учетом ветрового воздействия. Влияние сезонной изменчивости учитывается посредством задания температуры воды входящей из Босфора. Получены особенности в циркуляции вод моря в целом обусловленные влиянием ветра.

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

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

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

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

$$P = g\rho_0\zeta + g \int_0^z \alpha d\mu = g\rho_0\zeta + P', \quad (4)$$

$$T_t + (uT)_x + (vT)_y + (wT)_z = -\kappa^H \nabla^4 T + \kappa^V T_{zz}, \quad (5)$$

$$S_t + (uS)_x + (vS)_y + (wS)_z = -\kappa^H \nabla^4 S + \kappa^V S_{zz}, \quad (6)$$

$$\rho = \rho_0 + \alpha_1^T T + \alpha_1^S S + \alpha_2^T T^2 + \alpha^{ST} ST, \quad (7)$$

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

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

$$v_V u_z = -\tau^x, v_V v_z = -\tau^y, \quad (8)$$

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

На дне при $z = H(x, y)$:

$$u = v = w = 0, T_z = 0, S_z = 0. \quad (9)$$

На твердых боковых стенках: для меридиональных участков границы

$$u = 0, \nabla^2 u = 0, v_x = 0, \nabla^2 v_x = 0, \quad (10)$$

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

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

для зональных

$$v = 0, \nabla^2 v = 0, u_y = 0, \nabla^2 u_y = 0, \quad (11)$$

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

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

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

$$u = u^s, T = T^s, S = S^s, \quad (12)$$

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

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

для зональных

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

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

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

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

для меридиональных участков

$$u = u^s, v_x = 0, \nabla^2 v_x = 0, \quad (14)$$

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

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

для зональных

$$\begin{aligned}
v &= v^s, u_y = 0, \nabla^2 u_y = 0, \\
T_y &= 0, (\nabla^2 T)_y = 0, \\
S_y &= 0, (\nabla^2 S)_y = 0.
\end{aligned}
\tag{15}$$

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:

$$\begin{aligned}
u &= v = 0, \zeta = 0, T = T^0(x, y, z), \\
S &= S^0(x, y, z).
\end{aligned}
\tag{16}$$

На основе численной модели (1) – (16) проведен эксперимент по формированию циркуляции в Мраморном море под воздействием касательных напряжений трения ветра (8) с учетом скорости течений, температуры и солености в проливах (12) – (15). 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:

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

Шаг по времени в модели составлял 0,5 мин.

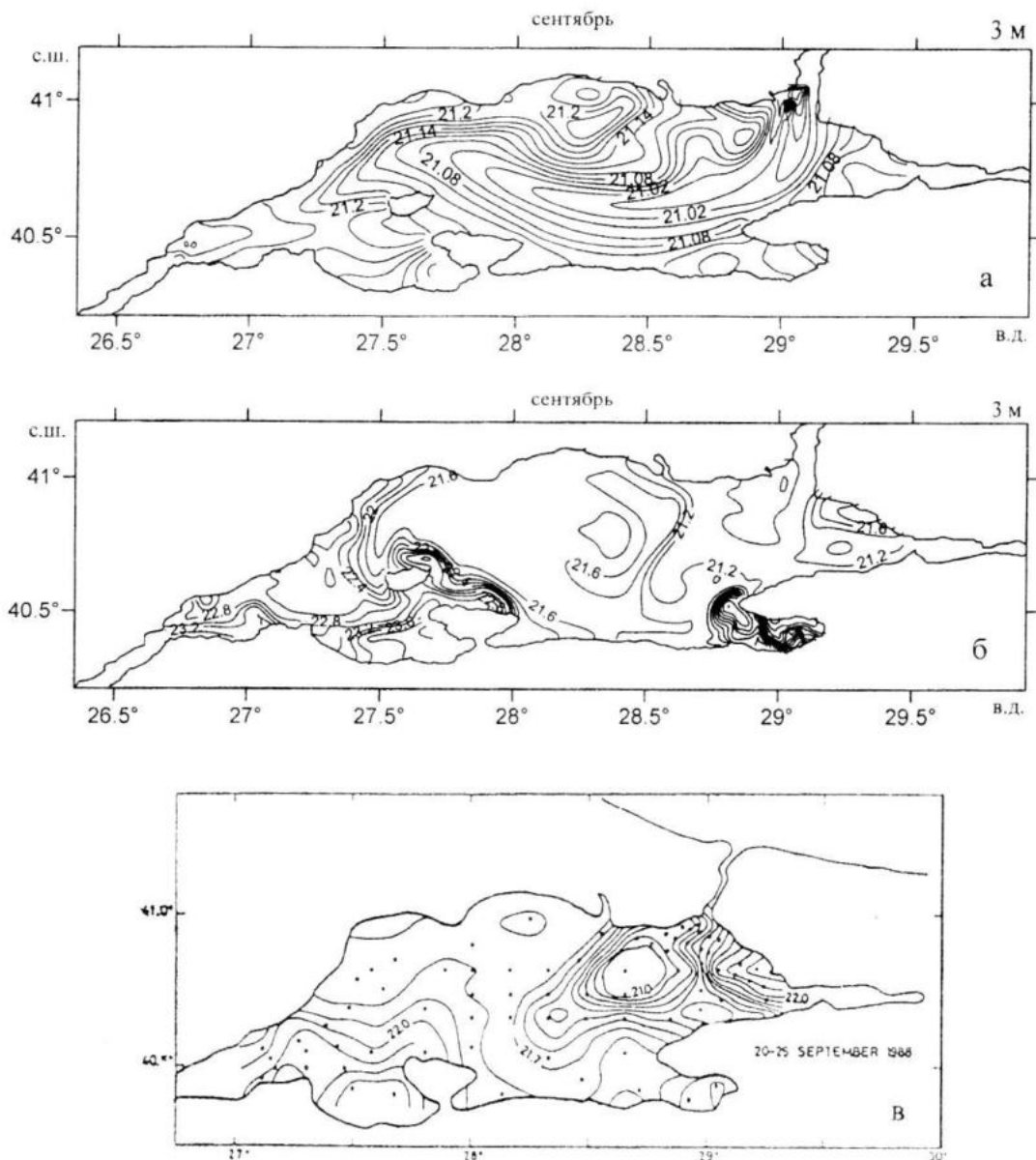
Скорости в Босфоре и Дарданеллах задавались постоянными по времени из расчета $650 \text{ км}^3/\text{год}$ в верхнебосфорском течении, $350 \text{ км}^3/\text{год}$ в нижнебосфорском, $830 \text{ км}^3/\text{год}$ в верхнем течении и $530 \text{ км}^3/\text{год}$ в нижнем в Дарданеллах [1]. Глубина слоев в проливах была принята следующей: в верхнем течении Босфора – 0 – 20 м, в нижнем – 20 – 100 м; в верхнем течении Дарданелл – 0 – 20 м, в нижнем – 20 – 75 м. При задании температуры в верхнебосфорском течении от поверхности моря до глубины 20 м учитывалась сезонная изменчивость. При этом значения температуры варьировались в пределах от 8 до $23,5 \text{ }^\circ\text{C}$ [1 – 5]. Соленость с глубиной изменялась от 21 до 30 ‰. В нижнем течении Дарданелл S

принимала значения от 34,5 до 38,68 ‰ на глубинах 20 – 75 м, температура была равна $14,6 \text{ }^\circ\text{C}$ [2, 3].

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 [6]. Ниже 30 м все имеющиеся данные наблюдений на данном горизонте в этот сезон усреднялись, и начальная температура и соленость не зависели от горизонтальных координат. На поверхности моря на каждые сутки задавались поля тангенциального напряжения трения ветра за 2008 г., полученные по данным счета региональной атмосферной модели MM5, адаптированной к условиям региона коллективом сотрудников отдела ВАО МГИ НАН Украины (руководитель доктор физ. - мат. наук Шокуров М. В.).

Уровень моря и горизонтальные скорости в начальный момент времени полагались равными нулю. Предполагалось также, что на поверхности моря потоки тепла и соли равны нулю. Время интегрирования уравнений модели составило 7450 суток (≈ 20 лет).

Рассмотрим особенности в распределении гидрофизических полей вод Мраморного моря, полученных в результате проведенного численного расчета. В отличие от эксперимента, проведенного без учета ветрового воздействия, но со всеми такими же остальными параметрами модели [7, 8], в поле уровня в летние месяцы наблюдается значительный подъем вод (до 8,5 см) в центральной части моря (в области центрального антициклона), а понижение становится более существенным (до 8 см) в восточной, южной и западной частях моря. В результате ветрового воздействия на глубине 3 м происходит заметное осолонение вод и образуются новые соленостные структуры. Так на рис. 1 представлены карты распределения полей солености, полученные для середины сентября по модели без учета касательного напряжения трения ветра (а), с учетом этого воздействия (б) и натурные данные для этого сезона года (в), приведенные в работе [1].



Р и с. 1. Поля солёности вод бассейна на горизонте 3 м в сентябре по модели без учета ветрового воздействия (а), с его учетом (б) и по натурным данным (в)

Из представленных рисунков видно, что значения солёности на поверхности моря в случае задания в модели ветрового воздействия более близки к наблюдаемым в реальных условиях. Так, близко к наблюдаемым воспроизводится расположение изолиний в районах центрального антициклона, Измидского залива и в придарданельской области. Влияние ветрового воздействия на распределение солёности в бассейне уже не сказывается на глубинах ниже 15 м. Это

может служить подтверждением устойчивой двухслойной структуры вод Мраморного моря.

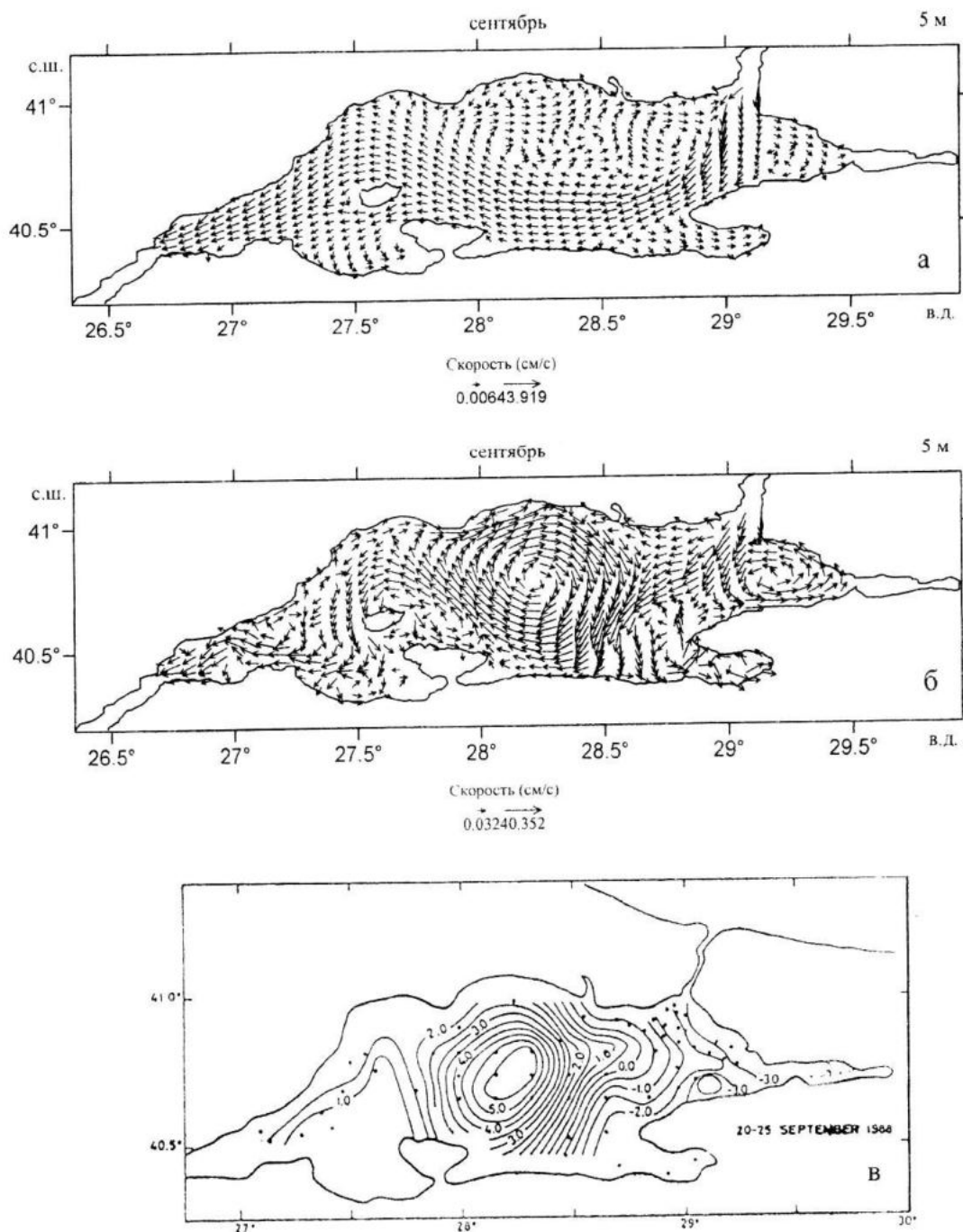
В результате горизонтального и вертикального перемешивания происходит заметное охлаждение вод на поверхности. По полученным картам полей температуры наблюдается размывание S-образного потока вод, выходящих из Босфора. При этом наибольшая температура на поверхности наблюдается в августе, минимальная – в феврале, марте. Этот

результат хорошо согласуется с описанием гидрологических характеристик района по натурным данным, приведенным в работе [1].

С увеличением глубины бассейна уменьшается влияние ветра на распределение полей температуры. Так на глуби-

не 30 м разница между значениями температуры без учета ветрового воздействия и с учетом ветра становится несущественной (не более $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Рассмотрим далее распределение скоростей течений.



Р и с. 2. Поля скоростей течений на горизонте 5 м в сентябре по модели без учета ветрового воздействия (а), с его учетом (б) и распределение аномалий динамических высот в сентябре, полученные по натурным данным (в)

В результате ветрового воздействия на поверхности моря возникает ряд вихревых образований, которые на протяжении года либо усиливают либо ослабляют S – образное струйное течение, которое обусловлено влиянием потоков импульса, тепла и соли через проливы. В летнее время существенно усиливается центральное антициклоническое образование. Также в первой половине декабря на поверхности моря наблюдается обратный (установившемуся S – образному течению) поток. Он направлен от пролива Дарданеллы к проливу Босфор. На глубинах более 10 м такое течение уже не наблюдается. В летнее время на глубинах 30 – 40 м также прослеживается под воздействием ветра интенсификация центрального антициклонического образования. С увеличением глубины бассейна влияние ветрового воздействия на распределение полей течений уменьшается.

Таким образом на основе численной модели динамики рассмотрена задача о формировании особенностей циркуляции Мраморного моря под влиянием обмена теплом, солью и импульсом через проливы Босфор и Дарданеллы с учетом ветрового воздействия. Задание температуры воды в верхнем слое пролива Босфор обеспечивает влияние климатического сезонного сигнала. Анализ результатов численного эксперимента показал, что в результате ветрового воздействия значительно увеличиваются подъем и опускание вод на поверхности моря, при этом максимальный перепад составляет около 17 см. На глубине 3 м происходит заметное осолонение вод и образуются новые соленостные структуры. В результате горизонтального и вертикального перемешивания происходит заметное охлаждение вод на поверхности и наблюдается размывание S-образного потока вод, выходящих из Босфора. На поверхности моря в первой декаде декабря наблюдается обратный (установившемуся S – образному течению) поток. Он направлен от пролива Дарданеллы к проливу Босфор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Surku T., Besiktepe, Halil I., Sur, Emin Ozsoy et al.* 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.
3. *Surku T., Besiktepe, Emin Ozsoy, and Umit Unluata* Filling of the Marmara Sea of by the Dardanelles Lower Layer Inflow // *Deep-Sea Reseach.* – 1993. – 40. – P. 1815 – 1838.
4. *Oguz T., Ozsoy E., Latif M.A. et al.* Modeling of hydraulically controlled exchange flow in the Bosphorus Strait. – *J. Phys. Oceanogr.* – 1990. – 20. – P. 945 – 965.
5. *Заневалов А.С.* Сезонная изменчивость вертикальных распределений температуры и солености в Мраморном море. – *Метеорология и гидрология.* – 2005. – 2. С. 78 – 84.
6. *Суворов А.М., Андриющенко Е.Г., Годин Е.А. и др.* Банк океанологических данных МГИ НАН Украины: содержание и структура баз данных, система управления базами данных // *Системы контроля окружающей среды.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2003. – С. 130 – 137.
7. *Демьшев С.Г., Довгая С.В.* Особенности течений в верхнем слое Мраморного моря // *Системы контроля окружающей среды / Модели окружающей среды.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. – С. 198 – 200.
8. *Демьшев С.Г., Довгая С.В.* Структура термохалинных полей вод Мраморного моря // *Системы контроля окружающей среды / Модели окружающей среды.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – С. 107 – 110.