

С.Г. Демьшев, С.В. Довгая

Численный эксперимент по моделированию гидрофизических полей Мраморного моря с учетом проливов Босфор и Дарданеллы

Проведен длительный прогностический эксперимент по изучению формирования гидродинамической структуры вод Мраморного моря с учетом проливов Босфор и Дарданеллы. Установлено, что взаимная адаптация гидрофизических полей и их приспособление к физико-географическим условиям моря происходят за счет быстрого (десятки суток) и медленного (несколько десятков лет) механизмов согласования. Сформировалось S-образное струйное течение, направленное от пролива Босфор к проливу Дарданеллы. В центральной части моря отчетливо прослеживаются два устойчивых антициклонических образования. Ниже наблюдается глубинное струйное течение, которое является следствием вхождения тяжелых средиземноморских вод. Полученные особенности циркуляции вод Мраморного моря подтверждаются данными наблюдений. Делается вывод о том, что главные особенности динамики Мраморного моря формируются под влиянием двух проливов.

Введение

Мраморное море является буферным между Черным и Средиземным морями. Через него осуществляется транспорт соленых и теплых средиземноморских вод в Черное море и более холодных и опресненных черноморских – в Средиземное. 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.

Численные эксперименты по моделированию гидрофизических полей в Мраморном море немногочисленны. В работе [1] представлена упрощенная боксовая модель, описывающая вертикальное распределение свойств вод Мраморного моря. В [2] приведена модель динамики Турецкой проливной системы (пролив Дарданеллы, Мраморное море, пролив Босфор), которая основана на вычислении потоков жидкости с использованием соотношений Кнудсена, выражающих равновесное состояние бюджетов масс воды.

В настоящей работе используется численная нелинейная трехмерная модель [3, 4], которая была адаптирована к условиям Мраморного моря с учетом проливов Босфор и Дарданеллы. На ее основе проведен длительный прогностический эксперимент по формированию циркуляции в Мраморном море под влиянием потоков импульса, соли и тепла через проливы. Получены основные закономерности гидрологической структуры вод Мраморного моря, которые подтверждены доступными данными наблюдений.

Общие характеристики бассейна

Мраморное море – глубоководный внутренний бассейн, разделяющий азиатскую и европейскую части Турции. Площадь его поверхности составляет 11500 км^2 , объем – 3378 км^3 [2]. С запада на восток размер бассейна $\sim 200 \text{ км}$, с севера на юг – около 70 км . Три депрессии занимают северную часть бассейна с максимальными глубинами 1097 , 1389 и 1238 м соответственно с запада на восток. Ширина порогов между западным, центральным и восточным бассейнами ~ 10 и 30 км соответственно. Южную часть бассейна занимает относительно мелководная шельфовая область со средней глубиной 100 м . Мраморное море связано с Черным морем проливом Босфор (средняя глубина $\approx 35 \text{ м}$), со Средиземным морем – проливом Дарданеллы (средняя глубина $\approx 55 \text{ м}$).

Характеристики водных масс Мраморного моря в основном определяются водообменом между Черным и Эгейским морями посредством проливов Босфор и Дарданеллы [5, 6]. Две различные водные массы Мраморного моря разделяются сильным пикноклином на глубине $20 - 30 \text{ м}$. Определенный по многолетним измерениям среднемесячный уровень солёности для всей акватории моря вблизи поверхности находится в пределах $21 - 26 \text{ ‰}$ [7]. Остальную часть бассейна занимают подгалоклинные высокосолёные воды Эгейского моря со средней солёностью $38,6 \text{ ‰}$ [6]. Что же касается температуры вод бассейна, то, согласно [7], на поверхности максимальные значения (24°C) наблюдаются в августе, минимальные ($7,5^\circ\text{C}$) – в феврале-марте. Резкое изменение солёности на границе двух слоев приводит к созданию устойчивой плотностной стратификации и препятствует вертикальному теплообмену. В связи с этим подгалоклинные воды имеют относительно постоянную температуру, равную $14,5^\circ\text{C}$ [2].

Постановка задачи

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

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

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

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

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

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

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

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

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

где $E = \rho_0 \frac{u^2 + v^2}{2}$, $\xi = v_x - u_y$. Остальные обозначения общеприняты.

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

Краевые условия. На поверхности при $z = 0$ имеем

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

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.

Начальные условия. При $t = t_0$

$$u = v = 0, \quad \zeta = 0, \quad T = T^0(x, y, z), \quad S = S^0(x, y, z). \quad (17)$$

Параметры модели и условия проведения эксперимента

Численный эксперимент проводился при разрешении по горизонтали 3,66 км по оси x , 2,5 км – по оси y . 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 [4]:

$$\nu_H = 10^6, \quad \kappa^H = 5 \cdot 10^5, \quad \nu_V = 5, \quad \kappa^V = 0,03 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Шаг по времени в модели составлял 2,5 мин.

Скорости в Босфоре и Дарданеллах задавались постоянными во времени из следующих условий: 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 [2]. При задании температуры в верхнебосфорском течении учитывалась сезонная изменчивость. Значения температуры, начиная с января, следующие: 11,2; 7; 7,1; 10,8; 14,3; 18; 22,1; 23,5; 20,3; 16,2; 15,3; 12,2°C. Соленость равнялась 21 ‰ [7]. В нижнем течении в Дарданеллах, согласно доступным данным измерений, соленость изменялась в пределах 36 – 38,68 ‰ на глубинах 25 – 63 м, температура была равна 14,6°C [7].

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 [8] для июля. Ниже 30 м все имеющиеся данные наблюдений на указанном горизонте в этот сезон осреднялись, начальная температура и соленость не зависели от горизонтальных координат. Уровень моря и горизонтальные скорости полагались равными нулю. Время интегрирования уравнений модели составило 10 000 сут.

Результаты численного эксперимента

Интегральные характеристики. Для анализа гидрофизических полей рассчитывались средние по объему и на отдельных горизонтах кинетическая энергия, соленость и температура.

Поведение кинетической энергии свидетельствует о двух механизмах согласования гидрофизических полей. Быстрое приспособление, когда поле скорости приспособляется под поле плотности, происходит приблизительно

но через 20 сут на верхних горизонтах и через 40 – 50 сут – на нижних. Медленное согласование между полем плотности, скорости и давления, географическими особенностями моря и краевыми условиями происходит на протяжении всего периода интегрирования.

Максимум кинетической энергии приходится на зимний сезон, минимум – на летний.

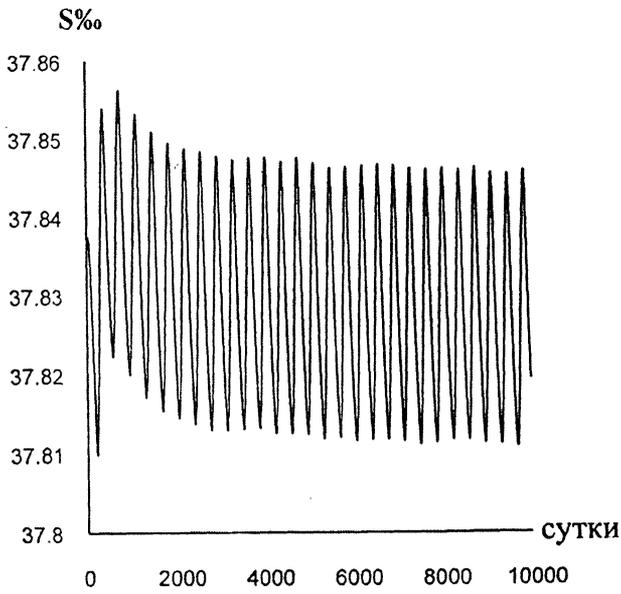
В поведении средней по объему солёности (S^m) можно отметить следующие особенности. Выделяется начальный период ~ 3000 сут, после которого наблюдается периодический режим в поведении S^m (рис. 1, а). Вторая особенность – незначительная изменчивость в средней за год S^m . В ее поведении имеют место сезонные колебания с амплитудой 0,0344 ‰. В верхнем слое 0 – 30 м время установления составляет приблизительно три года. Ниже время развития и установления поля солёности увеличивается до 25 лет (рис. 1, б). Сезонный сигнал проникает до 100 м.

Начальный период установления средней по объему температуры составляет ~ 1 год, и на протяжении всего периода интегрирования она имеет периодический характер (рис. 2, а). Зимой она достигает минимума, летом – максимума. Время выхода на периодический режим в слое 0 – 10 м не превышает года (что свидетельствует о согласовании начального поля и краевых условий), в слое 10 – 75 м – от 2 до 3 лет (рис. 2, б), ниже – до 5 лет. Сезонный сигнал также наблюдается до глубины 100 м. Отсутствие тренда имеет место на верхних горизонтах, приблизительно до 300 м. На глубине 300 м средняя температура имеет незначительный положительный тренд, причем в течение первых трех лет он отрицателен и выражен существенно резче, чем в последующее время. Ниже 300 м средняя температура также имеет незначительный положительный тренд. Как показывает анализ изменения температуры по времени, сезонный сигнал в поле температуры не проникает ниже 100 м.

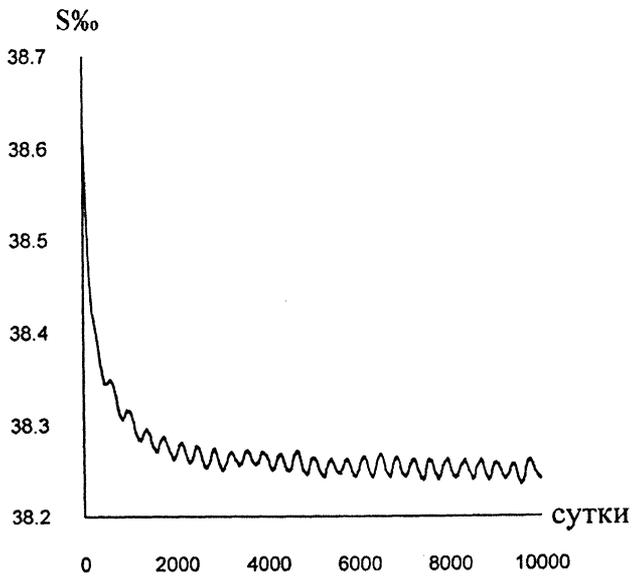
Гидрофизические поля

Приведенные пространственные распределения уровня поверхности, температуры, солёности и полей течений представлены на конечный момент времени интегрирования (9990-е сутки).

Уровень довольно монотонно убывает с севера на юг. Его значения не превышают 1 см, что свидетельствует о небольших геострофических скоростях в верхнем слое моря. Такая гладкая структура ζ , видимо, обусловлена относительно большой вязкостью и диффузией. Структура уровня соответствует S -образному струйному течению, направленному от пролива Босфор к проливу Дарданеллы. При этом положительные значения уровня вод ζ (до 0,8 см) располагаются в северной части бассейна, отрицательные (до – 0,4 см) – в южной части. Такой вид поверхностного течения хорошо согласуется с общей поверхностной циркуляцией Мраморного моря, схема которой приведена в работе [2].

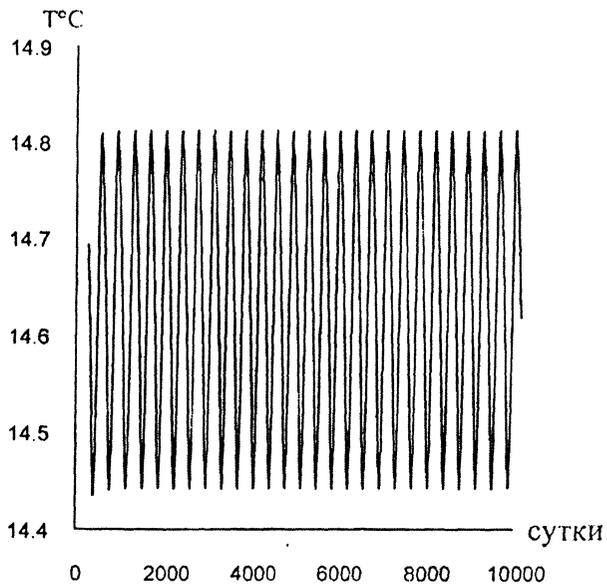


а

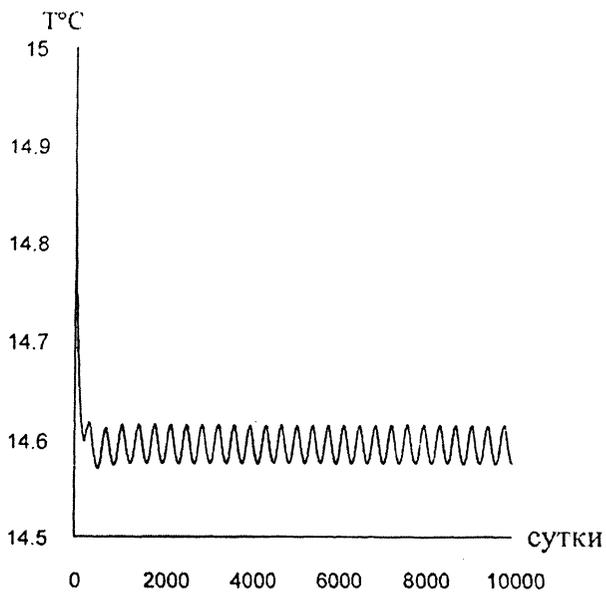


б

Р и с. 1. Графики поведения со временем средней по объему солёности (а) и средней солёности на горизонте 63 м (б)



а



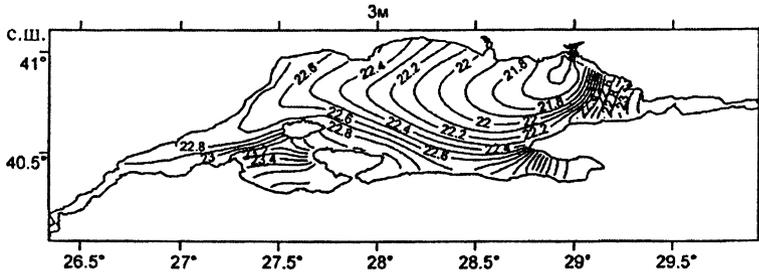
б

Р и с. 2. Графики поведения со временем средней по объему температуры (а) и средней температуры на горизонте 63 м (б)

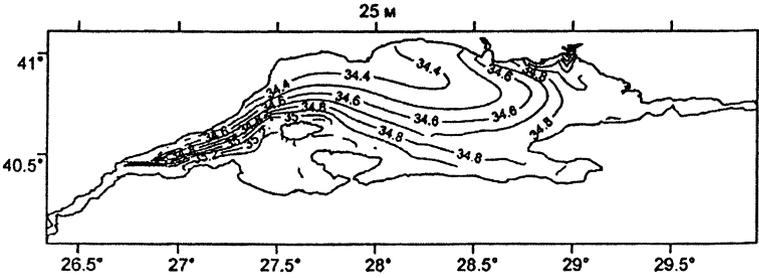
Структура поверхностного поля солёности Мраморного моря в основном определяется расположенным в его северо-восточной части источником входящей черноморской воды. Черноморские воды, перемещаясь на юго-запад к проливу Дарданеллы, в результате горизонтального и вертикального перемешивания становятся более солёными и, как видно из рис. 3, а, максимальное значение солёности (23,4 ‰) достигается в придарданельской области.

С ростом глубины увеличивается солёность вод бассейна. При $H = 15$ м в прибосфорском районе солёность становится равной 26,5 ‰, в придарданельском – 27,9 ‰. При этом изогалины ориентированы практически зонально, в то время как в приповерхностных слоях центральной части моря расположение изогалин более близко к меридиональному направлению. Разница в солёности по ширине моря (≈ 70 км) составляет 1,4 ‰ (ее увеличение происходит с севера на юг). Результатом вхождения более плотных вод Эгейского моря со средней солёностью 38,6 ‰ является заметное повышение солёности вод Мраморного моря ниже 25 м (рис. 3, б – з). Так, из района пролива Дарданеллы распространяется своего рода шлейф вод повышенной солёности, направленный в северо-восточную часть моря. На горизонте 30 м в центре северо-западной части выделяется область пониженных значений солёности, соответствующая антициклоническому образованию. Такое устойчивое образование прослеживается до глубины 50 м. Ниже солёность уменьшается с запада на восток от 38,32 до 38,18 ‰. Это согласуется с выводами работы [2] о преимущественном вкладе солёности в поле плотности и тем самым – халинном характере течений на глубинах 50 – 100 м. В слое 75 – 100 м изогалины становятся ориентированными зонально, при этом увеличение солёности происходит с юга на север: при $H = 100$ м в южной области моря $S = 38,52$ ‰, в северной области $S = 38,6$ ‰. Анализ полей солёности в слоях ниже 150 м показывает, что основные черты халинных полей становятся менее контрастными и заметно уменьшаются их градиенты (рис. 3, з).

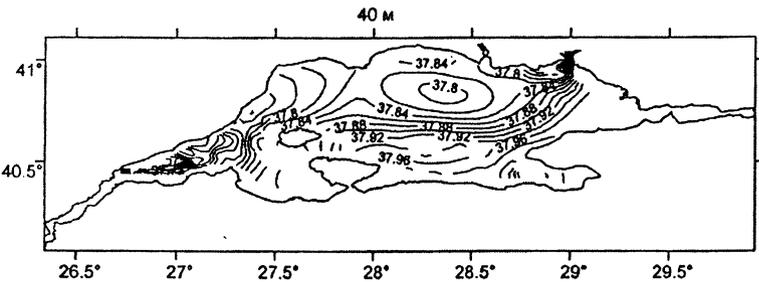
Температура поверхностного слоя Мраморного моря (рис. 4, а) имеет тенденцию роста в направлении с северо-востока на юго-запад, что определяется температурой входящих вод из Чёрного моря и их дальнейшим перемешиванием с более тёплыми водами Эгейского моря. Наименьшая температура $+11,6^{\circ}\text{C}$ наблюдается в прибосфорской проливной области, наибольшая $+15,8^{\circ}\text{C}$ – в придарданельской. Структура поля при этом такова, что все море представляет собой фронтальную зону с ростом температуры в юго-западном направлении. С глубиной, до горизонта 20 м, основные черты полей температуры в общем остаются неизменными, хотя и менее контрастными (ее значения уменьшаются до $+15,52^{\circ}\text{C}$ в придарданельской области и увеличиваются до $+14,8^{\circ}\text{C}$ – в прибосфорском районе). На глубине 25 м (рис. 4, б) прослеживается поступление из пролива Дарданеллы средиземноморских вод, температура которых изменяется от $+14,91^{\circ}\text{C}$ в юго-западной части моря до $+14,79^{\circ}\text{C}$ в северо-восточной. С дальнейшим увеличением глубины (начиная с горизонта 40 м) температура изменяется незначительно (рис. 4, в, з), мало отклоняясь от величины $+14,6^{\circ}\text{C}$, что хорошо согласуется с ее значениями на горизонтах 100 – 300 м по температурному сечению вдоль главной оси Мраморного моря [2].



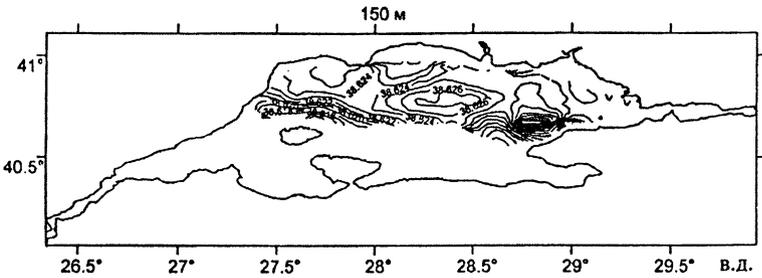
а



б

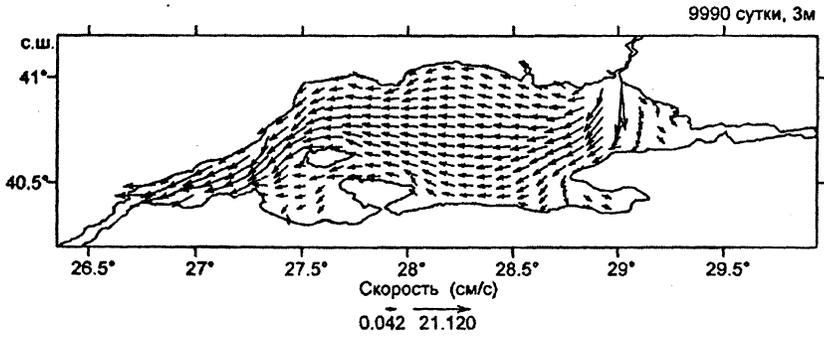


в

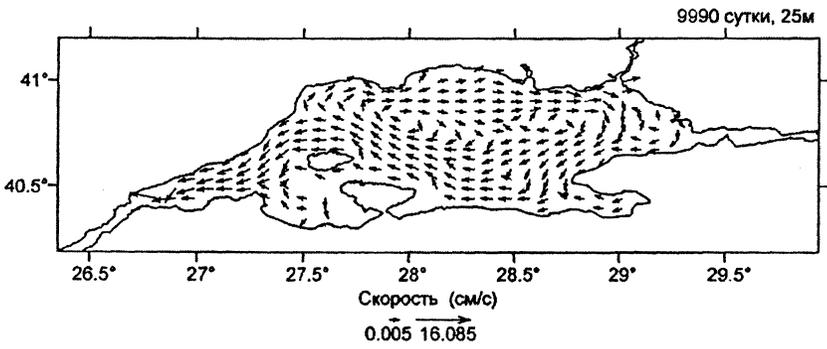


г

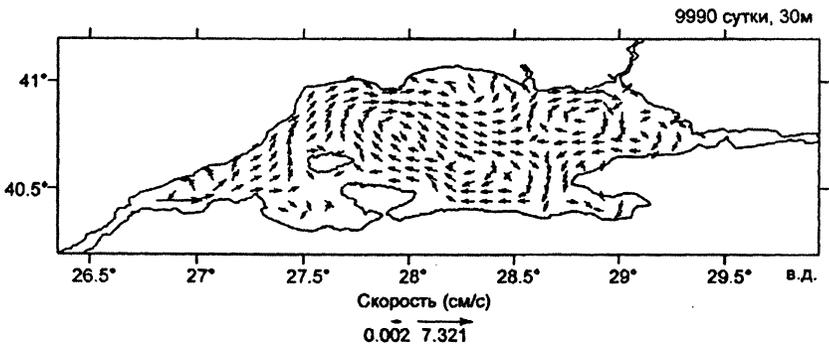
Р и с. 3. Поле солёности на горизонтах: а – 3 м, б – 25 м, в – 40 м, г – 150 м



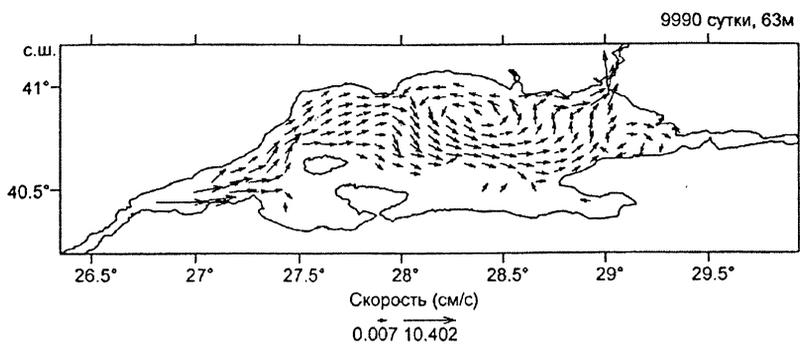
а



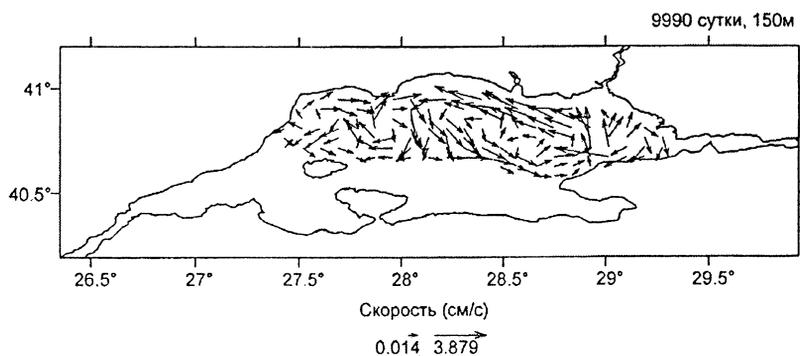
б



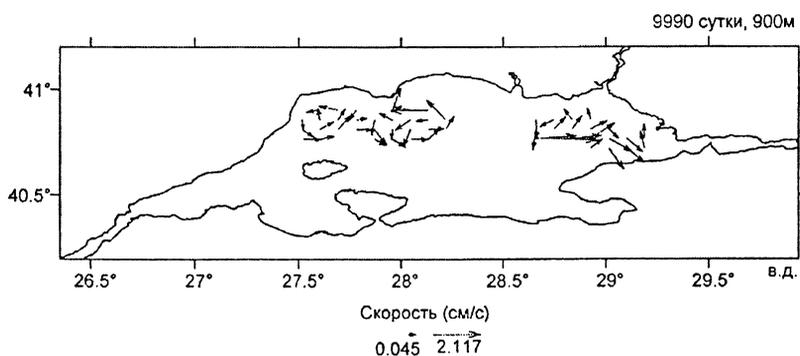
в



Г



Д



е

Р и с. 5. Скорость течений на горизонтах: а – 3 м, б – 25 м, в – 30 м, г – 63 м, д – 150 м, е – 900 м

На 9990-е сутки интегрирования установилась следующая картина циркуляции. Поверхностный слой охвачен потоком от пролива Босфор к проливу Дарданеллы (рис. 5, а). При этом зона потока охватывает практически всю ширину моря, и максимальные скорости (22,7 см/с) достигаются в предпроливных областях. С увеличением глубины в северной части моря начинают отчетливо выделяться два антициклонических образования, центры которых с изменением глубины до 25 м (рис. 5, б) смещаются с северной части бассейна к центральной. На более низких горизонтах структура циркуляции меняется. На горизонте 30 м (рис. 5, в) центры антициклонов смещаются к западу и востоку, формируя S-образное широкое течение, распространяющееся от пролива Дарданеллы к проливу Босфор. В западной и южной частях бассейна располагаются два антициклонических вихря, а в северной части – циклонический. Циклонический и восточный антициклонический вихри прослеживаются до 75 м (рис. 5, г). В слое 100 – 500 м, в центральной части моря, наблюдаются два циклонических вихря, на западе и востоке сформировались антициклонические круговороты (рис. 5, д, е). Ниже циркуляция становится менее интенсивной и расчленяется на множество небольших циркуляционных образований, сосредоточенных главным образом в трех глубоководных районах моря.

Заключение

Численная нелинейная модель циркуляции была адаптирована к условиям Мраморного моря. Проведен длительный прогностический эксперимент по исследованию влияния потоков импульса, тепла и соли через проливы Босфор и Дарданеллы на формирование гидродинамической структуры вод Мраморного моря. Установлено, что взаимная адаптация гидрофизических полей и их приспособление к физико-географическим условиям моря происходят за счет двух механизмов. Имеет место быстрое приспособление (20 – 50 сут) поля скорости к полю плотности (геострофическое согласование) и медленная адаптация поля плотности к физико-географическим условиям бассейна. В поведении S^m можно выделить период адаптации ~ 3000 сут. Время установления для температуры составляет ~ 1 год, в течение всего времени интегрирования она имеет периодический характер. Сезонный сигнал проникает до глубины 100 м. Дальнейшее интегрирование уравнений модели показало, что установление на нижних горизонтах происходит приблизительно через 50 лет.

Структура уровня соответствует S-образному струйному течению, направленному от пролива Босфор к проливу Дарданеллы. В подповерхностном слое центральной части моря отчетливо прослеживаются два устойчивых антициклонических образования. Ниже, на горизонте 30 м, располагается глубинное струйное течение, которое является следствием вхождения тяжелых средиземноморских вод. В северной части бассейна располагается циклонический вихрь, в западной и южной частях – антициклонические образования.

Указанные особенности циркуляции Мраморного моря подтверждаются данными наблюдений. Таким образом, проведенный расчет позволил сделать

важный вывод – в отсутствие потоков импульса, тепла и соли на поверхности некоторые основные особенности гидродинамики Мраморного моря формируются под влиянием двух проливов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Surku T. Besiktepe, Emin Ozsoy, Umit Unluata.* Filling of the Marmara Sea by the Dardanelles lower layer inflow // *Deep-Sea Res.* – 1993. – 40. – P. 1815 – 1838.
2. *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.
3. *Демьшев С.Г., Коротаев Г.К.* Численная консервативная модель бароклинных течений в океане // *Численное моделирование климата Мирового океана.* – М.: ОВМ, 1986. – С. 60 – 79.
4. *Демьшев С.Г., Кныш В.В., Коротаев Г.К.* Численное моделирование сезонной изменчивости гидрофизических полей Черного моря // *Морской гидрофизический журнал.* – 2003. – №3. – С. 12 – 26.
5. *Temel Oguz, Emin Ozsoy, Mohammed A. Latif et al.* Modeling of hydraulically controlled exchange flow in the Bosphorus Strait // *J. Phys. Oceanogr.* – 1990. – 20. – P. 945 – 965.
6. *Besiktepe T.S.* Density currents in the two-layer flow: an example of Dardanelles outflow // *Oceanol. Acta.* – 2003. – 26. – P. 243 – 253.
7. *Запелалов А.С.* Сезонная изменчивость вертикальных распределений температуры и солености в Мраморном море // *Метеорология и гидрология.* – 2005. – №2. – С. 78 – 84.
8. *Суворов А.М., Андрущенко Е.Г., Годин Е.А. и др.* Банк океанологических данных МГИ НАНУ: содержание и структура баз данных, система управления базами данных // *Системы контроля окружающей среды.* – Севастополь: МГИ НАНУ, 2003. – С. 130 – 137.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 03.08.05
После доработки 29.11.05

ABSTRACT Long-term prognostic experiment aimed at studying the formation of hydrodynamic structure of the Marmara Sea waters taking into account the straits of Bosphorus and Dardanelles is performed. It is revealed that mutual adaptation of hydrophysical fields and their adjustment to the physical-geographical sea conditions are the results of rapid (dozens of days) and slow (a few dozens of years) agreement mechanisms. S-like jet stream directed from the Bosphorus to the Dardanelles is formed. Two stable anticyclonic formations are pronouncedly observed in the central part of the sea. Deep stream flow which is a consequence of heavy Mediterranean water inflow is observed below. The obtained features of the Marmara Sea water circulation are confirmed by the observation data. The drawn conclusion is that the main features of the Marmara Sea hydrodynamics are formed being affected by two straits.