

Математическое моделирование морских систем

УДК 551.464.4

С.Г. Демьшев, С.В. Довгая

Численное моделирование циркуляции Мраморного моря в 2008 году с учетом ветра и водообмена через проливы Босфор и Дарданеллы

На основе численной нелинейной модели циркуляции проведен эксперимент по формированию гидродинамической структуры вод Мраморного моря под влиянием ветра и водообмена через проливы. Получено, что при сильных северо-восточных ветрах влияние проливов и ветра обеспечивает образование антициклонического круговорота на севере бассейна и циклонического – на юге, при слабом и умеренном ветре того же направления сохраняется и усиливается *S*-образная структура фронтальной зоны. Ветер с юго-запада разрушает такую структуру. Так, при сильном ветре этой направленности круговороты в южной и северной частях моря меняют знак завихренности. В поверхностном слое при относительно умеренных и сильных ветрах с юго-запада течение может менять направление и распространяться от пролива Дарданеллы к проливу Босфор, при этом ниже 5 м в верхнем слое моря оно направлено с востока на запад.

Ключевые слова: Мраморное море, циркуляция, гидрофизические поля, струйное течение, вихрь, галоклин.

Введение

Мраморное море – глубоководный бассейн, соединяющий Черное море через проливы Босфор и Дарданеллы с Эгейским и Средиземным морями. Адекватное воспроизведение гидродинамических процессов в этом бассейне позволит более точно описывать обмен теплом, солью и импульсом через проливы с соседними морями. К настоящему времени выполнено несколько работ по моделированию циркуляции в Мраморном море. В работе [1] приведена упрощенная боксовая модель Турецкой системы проливов, позволяющая воспроизводить общие закономерности вертикального распределения вод. В [2] на основе численной нелинейной трехмерной модели [3], адаптированной к условиям региона, при относительно грубом пространственном разрешении получено, что структура поля уровня соответствует *S*-образному течению, направленному от пролива Босфор к проливу Дарданеллы, в центральной части поверхностного слоя моря выделяется обширное антициклоническое образование, на глубине 30 м формируется течение вод из Эгейского моря, распространяющееся от пролива Дарданеллы к проливу Босфор. Улучшение пространственного разрешения [4, 5] позволило получить новые динамические особенности моря. В частности, установлено, что *S*-образное течение на поверхности моря имеет струйный характер и что около северной границы моря периодически образуется циклонический вихрь.

© С.Г. Демьшев, С.В. Довгая, 2014

В отличие от предыдущих в данной работе учитывается влияние ветрового воздействия на динамику вод Мраморного моря, остальные параметры модели остаются неизменными [4, 5]. Численный эксперимент проведен на основе гидродинамической модели с высоким пространственным разрешением на период 2008 г.

Условия проведения эксперимента

Географические особенности Мраморного моря кратко описаны в [1, 2], система уравнений с соответствующими начальными и краевыми условиями подробно представлена в [4, 5]. Напомним, что численный расчет проводился при разрешении по горизонтали 1,22 км – по оси x , 0,83 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. Шаг по времени в модели составлял 0,5 мин. Коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии по горизонтали и вертикали принимали соответственно следующие значения [6]:

$$\nu_H = 5 \cdot 10^{14}, \quad \kappa^H = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^4/\text{с}, \quad \nu_V = 5, \quad \kappa^V = 3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}.$$

В предыдущих расчетах было установлено, что увеличение коэффициента вертикальной турбулентной диффузии до $3 \cdot 10^{-1} \text{ см}^2/\text{с}$ при длительном интегрировании приводит к нарушению двухслойной структуры вод бассейна. В среднем толщина верхнего слоя для мраморноморской стратификации, согласно данным наблюдений, составляет 20 – 25 м, что и учитывалось при выборе этого коэффициента.

Скорости в проливах Босфор и Дарданеллы задавались постоянными во времени. Они рассчитывались с учетом принятых расходов: $650 \text{ км}^3/\text{год}$ в верхнем слое (0 – 20 м) и $350 \text{ км}^3/\text{год}$ в нижнем слое (20 – 100 м) пролива Босфор, $830 \text{ км}^3/\text{год}$ в верхнем слое (0 – 20 м) и $530 \text{ км}^3/\text{год}$ в нижнем слое (20 – 75 м) пролива Дарданеллы [1]. При задании температуры в верхнем слое пролива Босфор учитывалась ее сезонная изменчивость. При этом температура изменялась со временем в пределах $8 - 23,5^\circ\text{C}$, соленость с глубиной – в пределах $21 - 30\text{‰}$ [7]. В нижнем слое в проливе Дарданеллы на глубинах 20 – 75 м, согласно доступным данным измерений, соленость задавалась в пределах $34,5 - 38,68\text{‰}$, температура была равна $14,6^\circ\text{C}$ [8 – 10].

В качестве начальных гидрофизических полей принимались поля, соответствующие 6620 сут, из расчета, проведенного в эксперименте без учета ветра, остальные параметры остаются неизменными. Условия в проливах такие же, как и в постановке задачи без учета ветрового воздействия [4, 5]. На поверхности моря на каждые сутки задавались доступные на время интегрирования модели поля тангенциального напряжения трения ветра за 2008 г., полученные по данным расчета региональной атмосферной модели (<http://www.ucar.edu/mm5/mm4/home.html>). Эти расчеты проводились в отделе взаимодействия атмосферы и океана МГИ НАН Украины. Предполагалось также, что на поверхности моря потоки тепла и соли равны нулю.

Ветровой режим над акваторией Мраморного моря в рассматриваемый период, по имеющимся модельным данным, характеризовался следующими

особенностями. Наиболее устойчивыми и повторяемыми во времени были северо-восточные ветры, их порывы достигали более 14 м/с 24, 29 января, 10, 11, 17 февраля, 30 марта, 27 апреля, 3, 28 июня, 23, 27 – 29 августа, 13, 23 октября, 29, 30 декабря. Умеренные ветры этого направления повторялись на протяжении всего года и продолжались от 3 до 10 сут, исключением были март, май и декабрь. Значительную роль в циркуляции над морем играли и юго-западные ветры. Так, их порывы 10, 11, 18, 26 марта достигали более 15 м/с. Устойчивые ветры этого направления преобладали в марте и апреле, при этом они продолжались 4 – 9 сут. Заметно иным был режим атмосферной циркуляции в мае и декабре: в мае ветер с циклонической завихренностью сменился ветром с антициклонической завихренностью (при этом центры завихренностей располагались севернее бассейна моря), а в декабре не наблюдалось четко выраженного преобладания какого-либо определенного направления ветра. В большинстве случаев смена синоптических ситуаций происходила через маловетрие.

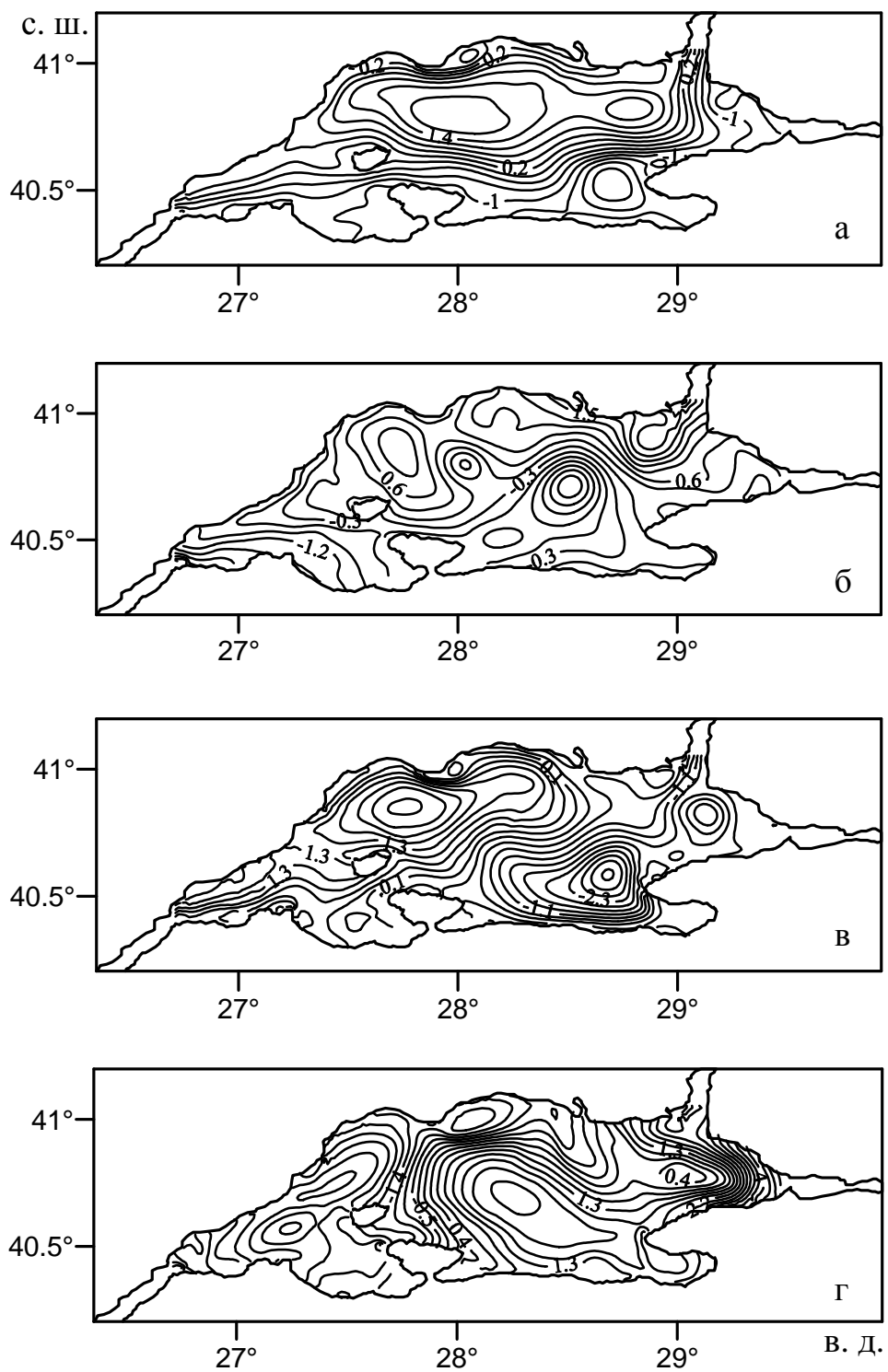
Результаты численного эксперимента

Интегральные характеристики. Для анализа результатов эксперимента были рассчитаны средние по объему и горизонтам температура, соленость и кинетическая энергия. При учете ветра кинетическая энергия в верхнем слое моря по сравнению с предыдущими расчетами, при которых учитывался только обмен через проливы, возросла на порядок. Максимум средней по объему энергии приходится на август, а средней по верхнему горизонту E – на февраль, когда скорость ветра была максимальной и составляла 20 м/с. Причина такого поведения кинетической энергии будет объяснена ниже.

Средняя по объему и горизонтам температура качественно ведет себя так же, как и в эксперименте, описанном в [4, 5]. Имеются количественные отличия в поведении средней температуры, которая на верхних горизонтах холоднее, на нижних – теплее. Средняя соленость, наоборот, в верхнем слое меньше, чем в расчете с отсутствием ветра, в нижнем – больше. Вероятно, такое отличие объясняется большой вертикальной адвекцией по сравнению с предыдущим расчетом и последующим горизонтальным перемешиванием.

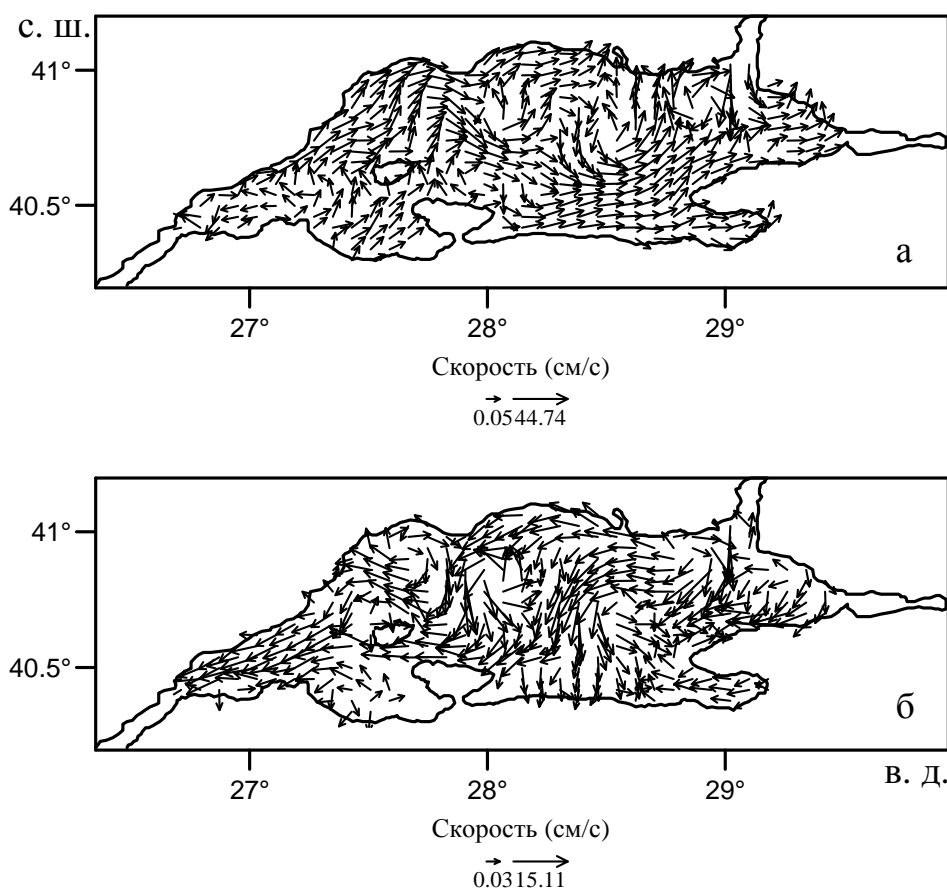
Течения. Приведенный уровень моря близок к динамическому, который характеризует структуру геострофических скоростей в верхнем слое. Они, в свою очередь, на средних широтах без учета дрейфовой компоненты близки к полным скоростям. Поэтому анализ поля уровня позволяет получить качественные характеристики подповерхностных геострофических течений.

Сопоставление полей уровня для различных ветров позволяет сделать вывод о зависимости крупномасштабных особенностей циркуляции от их силы и направления. Напомним, что при отсутствии ветра циркуляция в Мраморном море была довольно гладкой – на севере наблюдалась обширная зона слабого подъема вод (в среднем отклонение уровня составляло 2 см), на юге – зона опускания (в среднем отклонение уровня составляло 1,5 см) [4]. Эти две области разделялись фронтальной зоной, которая соответствовала S -образному течению.



Р и с. 1. Уровенная поверхность (см) 9 мая (а), 28 февраля (б), 30 марта (в) и 6 октября (г)

Под влиянием ветра изменчивость уровня значительно усилилась, перепад увеличился (рис. 1). При северо-восточных ветрах наблюдается течение, близкое к S-образному (рис. 1, а), которое соответствует наблюдениям [1] и результатам численного эксперимента при отсутствии ветра [4], когда циркуляция формировалась только под влиянием проливов Босфор и Дарданеллы. В верхнем 5-метровом слое моря велика дрейфовая составляющая скорости и большую часть акватории охватывает поток, направленный на запад. Ниже 10 м структура течений соответствует антициклоническому круговороту на севере моря и циклоническому – на юге. При юго-западном ветре циркуляция разбивается на отдельные вихревые образования (рис. 1, б) и имеет тенденцию к смене знака в южной и северной частях бассейна. При увеличении скорости северо-восточного ветра до 15 м/с формируется мощный антициклонический круговорот в западной половине моря и циклонический – в восточной (рис. 1, в). В этом случае в поверхностном слое образуется мощный поток с востока на запад, на нижних горизонтах поле скорости соответствует структуре уровня моря, что свидетельствует о преобладающем вкладе градиента плотности. При сильном юго-западном ветре происходит подъем уровня моря у восточного побережья, формируется область антициклонического вращения вод и тогда возможна смена знака круговоротов в южной и западной частях моря (рис. 1, г).



Р и с. 2. Поля скоростей (см/с) 28 февраля на горизонтах 3 м (а) и 20 м (б)

При северо-восточном ветре возникает ситуация, когда водообмен через проливы и ветер действуют в одном «направлении», поэтому при несильных ветрах усиливается и сохраняется S-образная структура фронтальной зоны. При юго-западных ветрах указанные факторы влияют противоположным образом, и когда ветер этого направления силен, циркуляция в южной и северной частях моря может менять знак (рис. 1, *з*).

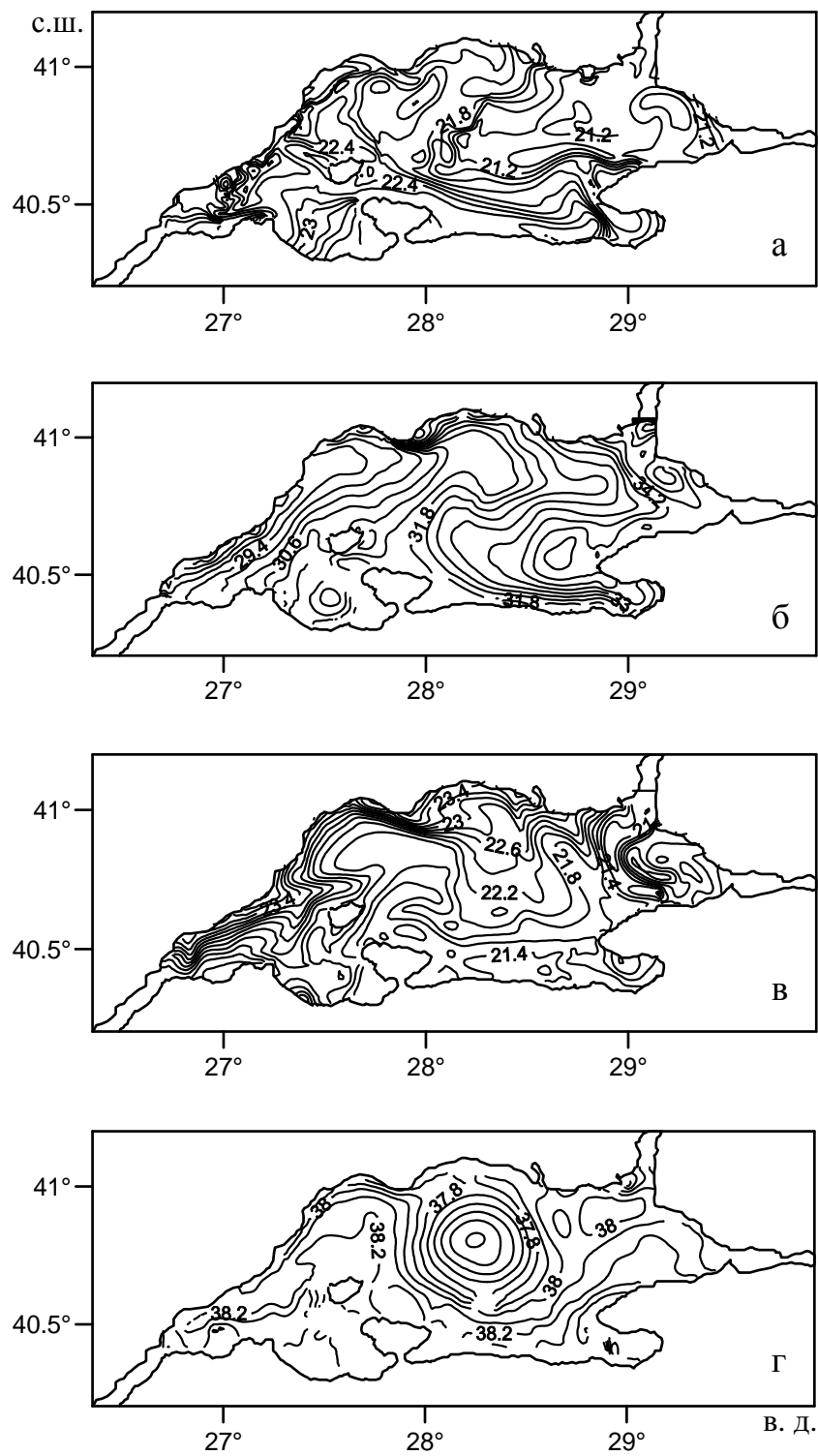
В поверхностном слое моря при относительно умеренных и сильных юго-западных ветрах течение может менять знак (рис. 2, *а*). Ниже 5 м структура течения имеет S-образный вид, оно направлено с востока на запад (рис. 2, *б*).

Соленость и температура. Большое влияние на формирование поля солености в верхнем 5-метровом слое оказывает приток менее соленой воды из пролива Босфор. При северо-восточных ветрах формируется область антициклонической циркуляции на севере бассейна и циклонической – на юге (рис. 1, *в*). В то же время влияние пролива Босфор и дрейфовой скорости в этом слое моря приводит к образованию обширной зоны менее соленой воды на северо-востоке бассейна (рис. 3, *а*), область более соленой воды оттесняется к северо-западу. Ниже 10 м (рис. 3, *б*) структура поля солености соответствует полю уровня в это время года (рис. 1, *в*).

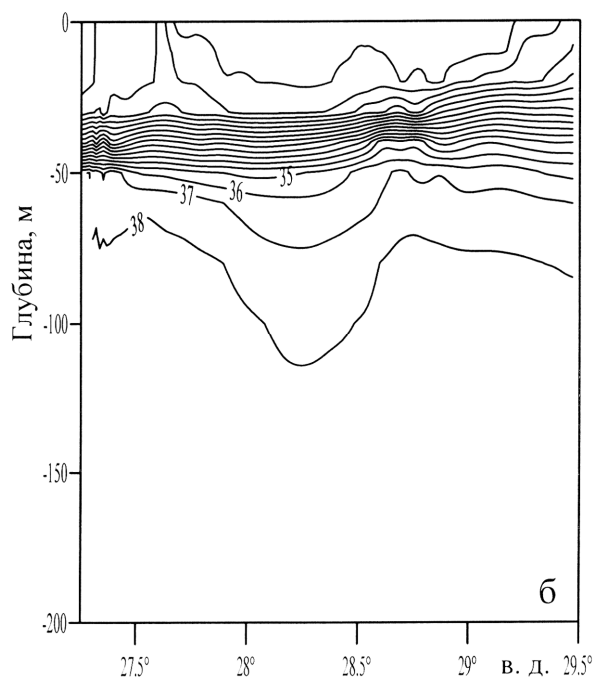
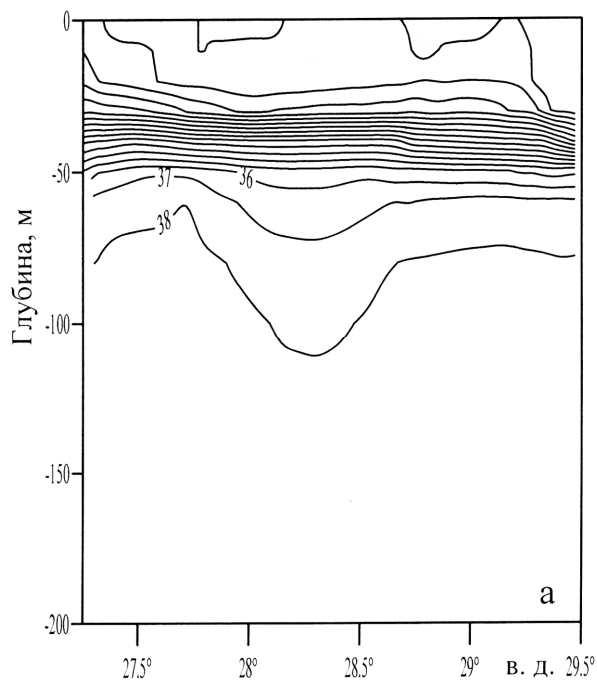
При устойчивых юго-западных ветрах происходит «запирание» поступающей менее соленой воды из Босфора (рис. 3, *в*) в верхнем слое моря. При их относительно длительном и постоянном по направлению действии наблюдается подъем вод в юго-западной области моря и опускание – в юго-восточной. Возможно, поэтому происходит смена знака циркуляции в северной и южной частях моря (рис. 1, *з*).

Ниже 25 м большое влияние на эволюцию вод оказывает приток более соленой воды из Эгейского моря. Но когда действие ветра приводит к формированию интенсивных круговоротов, в поле солености они могут проследиваться в глубинных слоях (рис. 3, *г*). Причем глубина проникновения отклика в поле солености зависит от длительности и силы ветра, но не от его направления.

В отличие от результатов расчета с отсутствием ветра, при котором галоклин имел практически горизонтальную структуру, на протяжении года наблюдается его наклон. Характерный пример приведен на рис. 4. В период 7 – 10 октября произошла смена направления ветра с юго-западного на северо-восточное. Когда ветер дует с запада, галоклин углубляется с запада на восток (рис. 4, *а*), при ветрах с востока, наоборот, – с востока на запад (рис. 4, *б*). По всей видимости, эти процессы обуславливают апвеллинги на западе и востоке области в соответствующие периоды времени. Влияние относительно сильных ветров в поле солености проследивается ниже 100 м (рис. 4).



Р и с. 3. Поля солёности (‰) 30 марта на горизонтах 2,5 м (а), 20 м (б) и 6 октября на горизонтах 2,5 м (в) и 40 м (г)



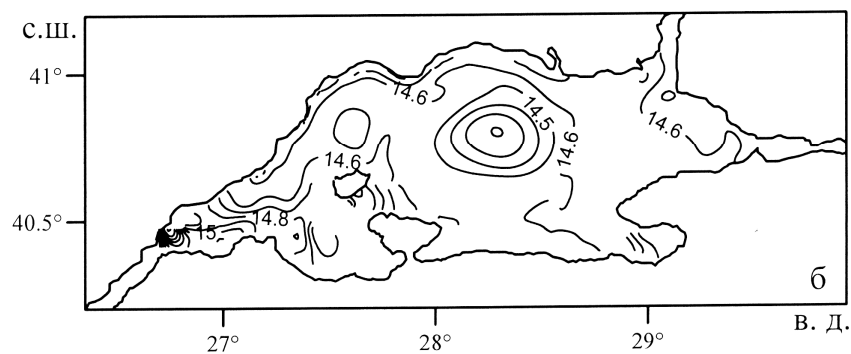
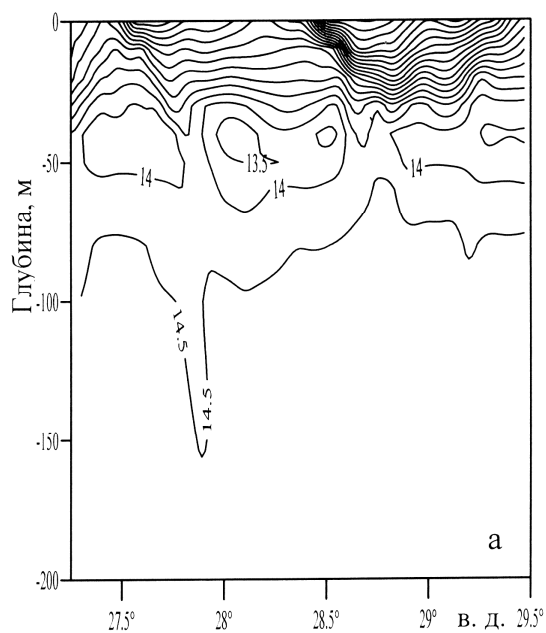
Р и с. 4. Вертикальное сечение в поле солёности (‰) по 40,8° с. ш. 6 октября (а) и 26 октября (б)

Преобладающее влияние на эволюцию температуры в верхнем слое моря оказывает поступление воды с сезонно меняющейся температурой через про-

ISSN 0233-7584. Мор. гидрофиз. журн., 2014, № 1 75

лив Босфор. Ее последующее распределение происходит вследствие переноса течениями, формирующимися под действием ветра, диффузии и потоков импульса через проливы.

В весенний период в восточную область бассейна начинает транспортироваться теплая вода, которая затем переносится течениями и перемешивается с окружающими водами. Так как величина K^V мала, то поступающая вода из Босфора в результате вертикальной диффузии практически не перемешивается с нижележащими водами. Поэтому в поле температуры могут возникать инверсии, о чем свидетельствует разрез на рис. 5, а.



Р и с. 5. Вертикальное сечение в поле температуры ($^{\circ}\text{C}$) по $40,8^{\circ}$ с. ш. 28 июля (а) и поле температуры на горизонте 40 м 6 октября (б)

Если холодная вода на нижних горизонтах попадает в вихрь, то возникает ситуация, когда вода в центре антициклонического вихря холоднее, чем на его периферии (рис. 5, б). В то же время поле солёности (рис. 3, з) соответствует антициклоническому круговороту.

Заключение

Проведенный эксперимент показал, что учет ветра значительно влияет на процессы формирования и изменчивости гидрофизических полей Мраморного моря.

При северо-восточных ветрах влияние ветра и водообмена через проливы обеспечивает образование антициклонического круговорота на севере бассейна и циклонического – на юге, при слабом и умеренном ветрах сохраняется и усиливается S-образная структура фронтальной зоны. Ветер, направленный с запада, разрушает такую структуру, и когда, например, юго-западный ветер силен, круговороты в южной и северной частях моря могут менять знак.

При юго-западных ветрах влияние пролива Босфор и дрейфовой скорости в верхнем 5-метровом слое приводит к образованию обширной зоны менее солёной воды на северо-востоке моря, область более солёной воды оттесняется к северо-западу. На нижних горизонтах структура поля солёности соответствует полю уровня. В отличие от эксперимента с отсутствием ветра, когда галоклин имеет практически горизонтальную структуру, при ветрах с восточной составляющей он заглубляется с востока на запад, при ветрах с западной составляющей наоборот – с запада на восток.

Вода с сезонно меняющейся температурой поступает в верхний слой моря через пролив Босфор, затем происходит ее эволюция вследствие транспорта течениями, формирующимися под действием ветра и потоков импульса через проливы. Так как вертикальная диффузия мала, обмен между горизонтами происходит, в основном, вследствие вертикальной адвекции. Вертикальная скорость в центральной части моря в слое 30 – 40 м в среднем составляет 0,002 см/с, поэтому в поле температуры возникают инверсии и вода в центре антициклона на нижних горизонтах может быть холоднее, чем на его периферии. Из полученных результатов следует, что, во-первых, требуется усовершенствование модели, при котором должны учитываться потоки тепла из атмосферы, необходимо также более корректно описать вязкость и диффузию по вертикали. И, во-вторых, вышеописанное поведение температуры свидетельствует о том, что преобладающий вклад в поле плотности вносит солёность.

Авторы выражают благодарность доктору физ.-мат. наук М.В. Шокурову за любезно предоставленные данные по касательным напряжениям трения ветра над Мраморным морем в 2008 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Besiktepe Surku T., Sur Halil I., Ozsoy Emin et al.* The circulation and hydrography of the Marmara Sea // *Prog. Oceanog.* – 1994. – 34. – P. 285 – 334.

2. Демьшев С.Г., Довгая С.В. Численный эксперимент по моделированию гидрофизических полей Мраморного моря с учетом проливов Босфор и Дарданеллы // Морской гидрофизический журнал. – 2007. – № 3. – С. 28 – 42.
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., Довгая С.В. Особенности течений в верхнем слое Мраморного моря // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. – С. 198 – 200.
5. Демьшев С.Г., Довгая С.В. Структура термохалинных полей вод Мраморного моря // Там же. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – Вып. 14. – С. 107 – 110.
6. 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.
7. 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.
8. Besiktepe S., Ozsoy E., Unluata U. Filling of the Marmara Sea by the Dardanelles lower layer inflow // Deep-Sea Res. – 1993. – 40. – P. 1815 – 1838.
9. Besiktepe S.T. Density currents in the two-layer flow: an example of Dardanelles outflow // Oceanol. Acta. – 2003. – 26. – P. 243 – 253.
10. Запелов А.С. Сезонная изменчивость вертикальных распределений температуры и солености в Мраморном море // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 2. – С. 78 – 84.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 28.03.12
После доработки 10.07.12

АНОТАЦІЯ На основі чисельної нелінійної моделі циркуляції проведено експеримент з формування гідродинамічної структури вод Мармурового моря під впливом вітру та водообміну через протоки. Отримано, що при сильних північно-східних вітрах вплив проток і вітру забезпечує утворення антициклонічного кругообігу на півночі басейну та циклонічного – на півдні, при слабкому та помірному вітрі того ж напрямку зберігається та посилюється S-подібна структура фронтальної зони. Вітер з південного заходу руйнує таку структуру. Так, при сильному вітрі цієї направленості кругообіги в південній та північній частинах моря змінюють знак завихореності. В поверхневому шарі при відносно помірних і сильних вітрах з південного заходу течія може змінювати напрям і розповсюджуватися від протоки Дарданелли до протоки Босфор, при цьому нижче 5 м у верхньому шарі моря вона спрямована зі сходу на захід.

Ключові слова: Мармурове море, циркуляція, гідрофізичні поля, струменева течія, вихор, галоклін.

ABSTRACT Experiment on formation of hydrodynamic structure of the Marmara Sea waters influenced by wind and water exchange through the channels is performed based on the numerical non-linear circulation model. It is revealed that at strong north-eastern winds, influence of the channels and wind provides formation of an anticyclonic gyre in the northern part of the basin and a cyclonic one – in the southern part. At weak and moderate wind of the same direction, the S-like structure of the frontal zone remains and increases. The south-western wind destroys such a structure. Thus, at strong wind of this direction the gyres in the southern and northern parts of the sea change the signs of vorticity. In the sea surface layer at relatively moderate and strong south-western winds, the flow can change its direction and propagate from the Dardanelles to the Bosphorus. At the same time in the sea upper layer the flow below 5 m is directed from east to west.

Keywords: Marmara Sea, circulation, hydrophysical fields, stream flow, eddy, halocline.