

Анализ сезонных энергетических характеристик динамики верхнего слоя вод Мраморного моря

С. Г. Демьшев, С. В. Довгая ✉

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия
✉ dovgayasvetlana0309@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.04.2021 г., после доработки – 30.04.2021 г.

Цель. Цель настоящей работы – оценка роли основных сил в формировании динамических структур верхнего слоя вод Мраморного моря в различные гидрологические сезоны.

Методы и результаты. С помощью численной модели Морского гидрофизического института Российской академии наук рассчитаны гидродинамические и энергетические характеристики циркуляции моря. Пространственное разрешение по горизонтали составило $1,22 \times 0,83$ км, по вертикали использовалось 18 горизонтов, шаг по времени 0,5 мин. Характеристики поступающих через проливы Босфор и Дарданеллы вод соответствовали доступным данным наблюдений. На поверхности моря задавались средние ежесуточные поля тангенциального напряжения трения ветра, потоков тепла, осадков и испарения для 2008 г., рассчитанные по региональной атмосферной модели ММ5. Рассматривались пространственные распределения вихревых структур и соответствующие им энергетические потоки в верхнем слое моря для различных сезонов. Анализ среднесезонных пространственных распределений поля скорости течения и составляющих бюджета кинетической энергии показал, что вихри в верхнем слое моря в течение года формируются главным образом с помощью двух механизмов. В центральной части моря генерация крупномасштабного антициклона и его сезонная изменчивость в основном определяются работой силы ветра, а формирование и эволюция прибрежных циклонических круговоротов обусловлены работой силы плавучести. В полях работы сил плавучести, давления и трения выделяются зоны локальных экстремумов. Две из этих зон – районы поступления вод из проливов Босфор и Дарданеллы. Наибольшая изменчивость наблюдается в районе Босфора, что обусловлено влиянием втекающих черноморских вод на сезонный характер мраморноморской циркуляции. Другие зоны экстремальных значений обусловлены неоднородностями береговой черты, что приводит к формированию прибрежных вихрей, источником энергии для которых является доступная потенциальная энергия.

Выводы. По результатам анализа проведенного численного эксперимента можно заключить, что в верхнем слое Мраморного моря формирование и изменчивость центрального антициклона определяются ветровым воздействием, а прибрежных циклонов – работой силы плавучести.

Ключевые слова: численная гидродинамическая модель, Мраморное море, антициклон, циклон, кинетическая энергия, работа силы ветра, работа силы плавучести

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0555-2021-0004 «Фундаментальные исследования океанологических процессов, определяющих состояние и эволюцию морской среды под влиянием естественных и антропогенных факторов, на основе методов наблюдения и моделирования».

Для цитирования: Демьшев С. Г., Довгая С. В. Анализ сезонных энергетических характеристик динамики верхнего слоя вод Мраморного моря // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 5. С. 509–524. doi:10.22449/0233-7584-2021-5-509-524

Analysis of Seasonal Energy Characteristics of the Marmara Sea Upper Layer Dynamics

S. G. Demyshev, S. V. Dovgaya ✉

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

✉ dovgayasvetlana0309@yandex.ru

Purpose. The aim of the work is to assess the role of the basic forces in formation of the dynamic structures of the upper layer in the Marmara Sea in different hydrological seasons.

Methods and Results. The numerical model developed in Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, was used to calculate the hydrodynamic and energy characteristics of the sea circulation. The horizontal spatial resolution was 1.22×0.83 km, 18 horizons were used vertically, and the time step was 0.5 min. The characteristics of the waters inflowing through the Bosphorus and Dardanelles straits corresponded to the available observational data. On the sea surface, the daily average fields of tangential wind stress, heat fluxes, precipitation and evaporation for 2008 were pre-set; these parameters were calculated using the regional atmospheric model *MM5*. Spatial distributions of the vortex structures and the corresponding energy flows in the upper sea layer for different seasons were considered. Having been analyzed, the average seasonal spatial distributions of the current velocity fields and the components of the kinetic energy budget showed that during the year, the vortices in the upper sea layer were formed mainly by two mechanisms. In the central part of the sea, generation of a large-scale anticyclone and its seasonal variability are basically conditioned by the wind forcing, whereas formation and evolution of coastal cyclonic eddies are caused by the buoyancy force. In the fields where the buoyancy, pressure and friction forcing takes place, the zones of local extremes are distinguished. Two of them are the areas of water inflow through the Bosphorus and Dardanelles straits. The strongest variability is observed in the Bosphorus region that is certainly conditioned by the fact that the inflowing Black Sea waters have a decisive influence on seasonal nature of the Marmara Sea circulation. The extreme values in the other zones are the result of the coastline structure heterogeneities, that leads to formation of the coastal eddies, the energy source for which is the available potential energy.

Conclusions. Analysis of the results of the performed numerical experiment makes it possible to conclude that in the upper layer of the Marmara Sea, formation and variability of the central anticyclone are conditioned by the wind forcing, while those of the coastal cyclones – by the buoyancy effect.

Keywords: numerical hydrodynamic model, Marmara Sea, anticyclone, cyclone, kinetic energy, wind forcing, buoyancy forcing

Acknowledgments: the investigation was carried out within the framework of the state task on theme No. 0555-2021-0004 "Fundamental studies of oceanological processes determining state and evolution of marine environment under the influence of natural and anthropogenic factors, based on observation and modeling methods".

For citation: Demyshev, S.G. and Dovgaya, S.V., 2021. Analysis of Seasonal Energy Characteristics of the Marmara Sea Upper Layer Dynamics. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(5), pp. 471-485. doi:10.22449/1573-160X-2021-5-471-485

Введение

На динамику вод Черного и Эгейского морей существенное влияние оказывает Мраморное море, которое является частью водной соединительной системы между ними. Первые результаты по численному моделированию вертикальных гидродинамических процессов в Мраморном море с использованием упрощенной боксовой модели приведены в [1].

С применением численной нелинейной трехмерной модели Морского гидрофизического института (МГИ) в работе [2] рассчитаны характерные черты динамики вод бассейна под влиянием потоков импульса через проливы Босфор и Дарданеллы и без учета воздействия атмосферных потоков. Полу-

чен ряд особенностей циркуляции моря, а именно: формирование в верхнем слое моря *S*-образного струйного потока, направленного от пролива Босфор к проливу Дарданеллы, с максимальными значениями скорости до 60 см/с, периодическое образование около северной границы циклонического вихря. Численные решения, воспроизводящие общую циркуляцию в море в сентябре – декабре 2008 г. и феврале – марте 2009 г. с использованием модели *ROMS* и реальных экспериментальных данных, представлены в [3]. Показано, что ветер и потоки вод через проливы влияют на силу и расположение главных мезомасштабных особенностей циркуляции моря.

Гидрофизические поля вод Мраморного моря на сентябрь и декабрь 2013 г. в работе [4] построены на основе метода многокомпонентного расщепления модифицированной модели с искусственной сжимаемостью для решения трехмерных уравнений гидродинамики океана без приближения гидростатики. Указано, что эффекты негидростатической динамики проявляются на склонах дна, где происходит интенсификация течения и проявляется его изменчивость по времени.

С помощью общей модели циркуляции Массачусетского технологического института (*MITgcm*) в работе [5] исследуется смешанный бароклинно-баротропный отклик в системе турецких проливов (*TSS*), включающей Босфор, Мраморное море и Дарданеллы, при отсутствии атмосферных и приливных эффектов. Получены типы циркуляции вод поверхностного слоя моря при двухслойном обмене через пролив Босфор и при блокировке потока через его нижний слой.

Численное моделирование циркуляции Мраморного моря в составе каскадной системы Азовского – Черного – Мраморного – Средиземного морей с использованием модели с неструктурированной сеткой *SCHISM* проведено в [6]. Корреляционный анализ численных результатов показал, что на процесс переноса между Черным и Мраморным морями влияет не только разница в уровнях морей по обе стороны пролива Босфор, но и характеристики циркуляций этих морей, которые вносят существенный вклад в транспортировку воды в этом регионе.

В работе [7] на период 2008–2013 гг. моделировалась циркуляция в *TSS* с использованием неструктурированной сетки при реальном атмосферном воздействии. Получено, что в зависимости от локализации максимума напряжения трения ветра возникают два разных среднегодовых типа циркуляции поверхностных вод Мраморного моря. Когда максимум напряжения трения ветра локализуется в центральном бассейне, струя Босфора течет к югу и поворачивает на запад после достижения п-ова Бозбурун. Напротив, когда область максимума напряжения трения ветра увеличивается и расширяется в направлении север – юг, струя отклоняется на запад и, достигая южного побережья, образует циклонический круговорот в центральном бассейне.

Эксперимент по моделированию системы наблюдений *OSSE* (*Observing System Simulation Experiment*) в рассматриваемом бассейне представлен в [8]. В работе применяется модель циркуляции океана высокого разрешения (*FESOM*) с ассимиляцией данных ансамбля наблюдений (*DART*) по пути следования пассажирских паромов в восточной части Мраморного моря. Результаты работы показывают, что использование данных измерений по пути движения паромов может значительно уменьшить погрешности в определении полей солено-

сти и температуры в верхнем слое моря. Влияние ассимиляции данных на описание процессов в нижнем слое несущественно из-за сильной стратификации.

Для понимания физических причин формирования гидродинамических особенностей циркуляции в морских бассейнах, в том числе и для Мраморного моря, важное значение имеет анализ энергетического баланса. Он позволяет оценить роль основных сил в образовании и эволюции течений и поля плотности. В [9] были получены дискретные уравнения скорости изменения кинетической и потенциальной энергии, которые в точности соответствуют конечно-разностным уравнениям численной гидродинамической модели МГИ, и изучены особенности энергетических циклов климатической циркуляции вод Черного моря. В данной работе исследуются пространственные распределения энергетических характеристик динамики вод в верхнем слое Мраморного моря для 2008 г. и роль основных сил в формировании и эволюции вихревых структур различного пространственно-временного масштаба.

Параметры модели

Топографические особенности бассейна Мраморного моря представлены на рис. 1. Система уравнений модели Мраморного моря в приближениях Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды и используемые параметры приведены в работах [10, 11]. Напомним значения этих параметров: по вертикали расчет проводился на 18 горизонтах; 1,22 км и 0,83 км – разрешение модели по осям x и y соответственно; 0,5 мин – шаг по времени. В проливе Босфор скорости потоков рассчитывались по расходам в верхнем слое, равным $650 \text{ км}^3/\text{год}$, в нижнем – $350 \text{ км}^3/\text{год}$, для расчета скорости течений в проливе Дарданеллы использовались значения расхода соответственно 830 и $530 \text{ км}^3/\text{год}$ [1, 12]. Согласно [13], вода, поступающая из пролива Босфор, имела температуру, изменяющуюся по глубине и со временем в пределах $8\text{--}23,5 \text{ }^\circ\text{C}$, соленость варьировалась от 21 до 30 ‰ в зависимости от глубины. Входящие через пролив Дарданеллы водные массы имели температуру $14,6 \text{ }^\circ\text{C}$, соленость изменялась по горизонтам от 34,5 до 38,68 ‰ [14, 15].



Рис. 1. Схематическая топографическая карта бассейна Мраморного моря

Fig. 1. Schematic topographic map of the Marmara Sea basin

Результаты расчета по региональной атмосферной модели *Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model* версия 3.7 (MM5) (URL: <http://www.ucar.edu/mm5/mm4/home.html>) использовались для определения средних ежесуточных полей тангенциального напряжения трения ветра, потоков тепла, осадков и испарения за 2008 г. на поверхности моря.

В качестве начальных полей уровня, температуры, солёности, горизонтальных составляющих скорости течения брались поля, полученные в результате численного расчета по этой же модели с аналогичными параметрами, но без учета влияния атмосферы [2] и соответствовавшие 28 августа (6620-е сутки счета).

Анализ результатов численного эксперимента

Рассмотрим пространственные распределения вихревых структур и соответствующих им энергетических потоков в верхнем слое моря для различных сезонов. Зимний, весенний, летний и осенний гидрологические сезоны представляют собой трехмесячные промежутки времени, которые начинаются соответственно с 1 января, 1 апреля, 1 июля и 1 октября.

Напомним в дифференциальной форме вид уравнения скорости изменения кинетической энергии (КЭ) и его составляющих [11]. Так как в квазистатическом приближении КЭ выражается в виде $E = \rho_0(u^2 + v^2)/2$, символьная запись уравнения бюджета КЭ будет иметь вид

$$E_t + Adv(P + E) = BFW + F_{Bfr}^\tau(E) - Diss_{Ver}(E) - Diss_{Hor}(E), \quad (1)$$

При этом работа сил давления и адвекция КЭ выражаются уравнением

$$Adv(P + E) = \left(u \left(g\zeta + E + P' \right) \right)_x + \left(v \left(g\zeta + E + P' \right) \right)_y + \left(w \left(g\zeta + E + P' \right) \right)_z.$$

Работа силы плавучести, приток энергии от ветра и потеря ее вследствие трения о дно, диссипация КЭ вследствие вертикального и горизонтального внутреннего трения выражаются соответственно следующим образом:

$$BFW = g\rho w,$$

$$F_{Bfr}^\tau(E) = \nu_V (uu_z + vv_z)_z,$$

$$Diss_{Ver}(E) = \nu_V (u_z^2 + v_z^2),$$

$$Diss_{Hor}(E) = \nu_H \left((\nabla^2 u)^2 + (\nabla^2 v)^2 \right).$$

Интегрирование (1) по объему дает:

$$\begin{aligned} \langle E_t \rangle_V + \langle Adv(E) \rangle_V + \langle Adv(P) \rangle_V = \langle BFW \rangle_V + \langle \tau \rightarrow E \rangle_S - \\ - \langle Diss_{Ver}(E) \rangle_V - \langle Diss_{Hor}(E) \rangle_V. \end{aligned} \quad (2)$$

В уравнении (2) для удобства анализа выделено отдельно слагаемое $\langle \tau \rightarrow E \rangle_S$, описывающее приток КЭ от ветрового воздействия, а вклад от $F_{Bfr}^\tau(E)$ вследствие трения о дно внесен в $\langle Diss_{Ver}(E) \rangle_V$.

Полагаем мезомасштабными квазигеострофическими вихрями такие, радиусы которых больше бароклинного радиуса деформации Россби (R_d) и число Россби (Ro) для которых значительно меньше единицы [16]:

$$R_d = \frac{\sqrt{gH(\Delta\rho/\rho)}}{f}, \quad (3)$$

$$Ro = \frac{U}{Rf},$$

где g – ускорение свободного падения; H – глубина верхнего слоя; ρ – плотность морской воды на поверхности; $\Delta\rho$ – изменение плотности морской воды с глубиной; f – параметр Кориолиса; U – орбитальная скорость вихря; R – радиус вихря. Следуя формуле (3), для Мраморного моря при значениях параметров $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, $H = 25 \text{ м}$, $\Delta\rho/\rho = 10^{-2}$, $f = 9,53 \cdot 10^{-5} \text{ 1/с}$ получим, что $R_d = 17 \text{ км}$.

Зимний сезон. Осреднение за зимний гидрологический сезон (как и за все сезоны) полей скорости течения, работы силы ветра, плавучести, давления, адвекции КЭ, горизонтальной диссипации, вертикальной диссипации в верхнем слое (рис. 2) проводилось по формуле

$$\varphi = \frac{1}{H} \int_0^H \varphi dz,$$

где $H \leq 20 \text{ м}$.

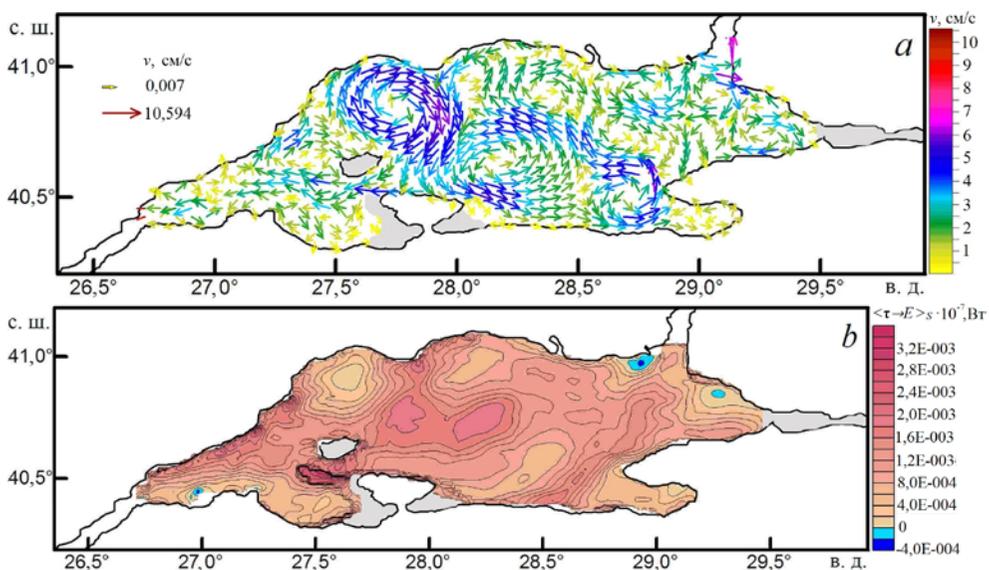
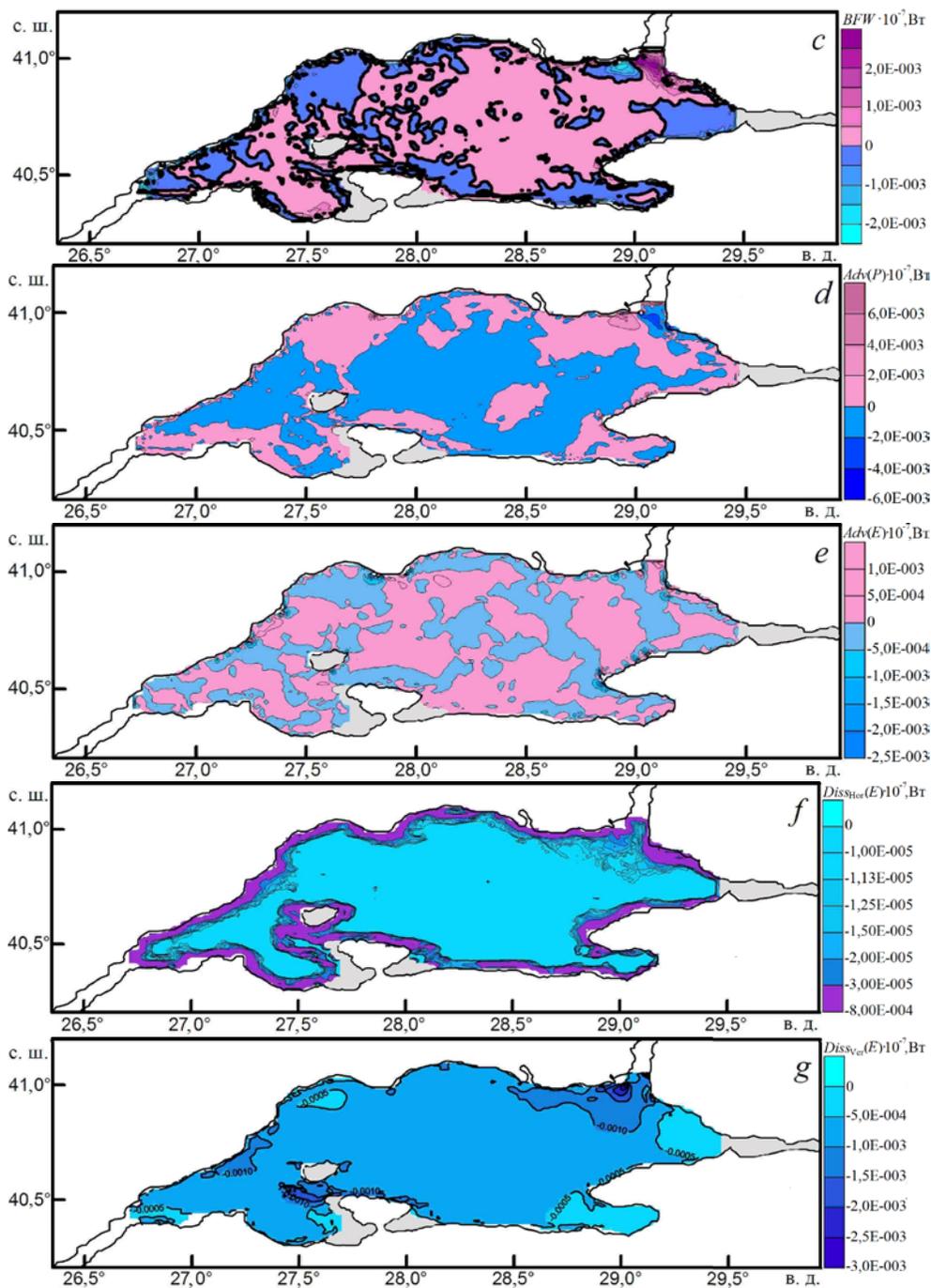


Рис. 2. Карты средних за зимний гидрологический сезон полей скорости течения (векторы) (a), работы силы ветра (b), плавучести (c), давления (d), адвекции кинетической энергии (e), горизонтальной диссипации (f), вертикальной диссипации (g) (изолинии) в верхнем 20-метровом слое вод Мраморного моря

Fig. 2. Maps of the current velocity (vectors) (a), wind force (b), buoyancy (c), pressure (d), kinetic energy advection (e), horizontal dissipation (f) and vertical dissipation (g) average fields in the upper 20-meter water layer of the Marmara Sea during the winter hydrological season

Продолжение рис. 2
Continuation of Fig. 2



В верхнем слое при движении вод от пролива Босфор к проливу Дарданеллы в северо-западной части бассейна сформировался мезомасштабный

антициклон (рис. 2, *a*) с диаметром около 38 км и $Ro = 0,017$. В северной и северо-восточной частях моря располагается система из двух антициклонов с радиусами циркуляции 10 км ($Ro = 0,042$) и 8 км ($Ro = 0,053$) соответственно. В южной части моря преобладает движение вод с циклонической завихренностью. При этом радиусы круговоротов составляют 20 и 12 км (числа Россби равны 0,021 и 0,041 соответственно). Сравнение рис. 2, *a* и *b* позволяет сделать вывод об их соответствии, что свидетельствует о преобладающем влиянии ветрового воздействия на формирование вихрей.

Важной энергетической характеристикой является работа силы плавучести [9], которая обеспечивает обмен между кинетической и доступной потенциальной энергией. На карте распределения скорости течения (рис. 2, *a*) в окрестностях вхождения вод из проливов Босфор и Дарданеллы располагаются циклоны с центрами в точках с координатами $29,1^\circ$ в. д., $40,7^\circ$ с. ш.; $28,8^\circ$ в. д., $40,9^\circ$ с. ш.; $26,9^\circ$ в. д., $40,4^\circ$ с. ш. и радиусом циркуляции от 3 до 3,5 км. Для этих круговоротов числа Россби равны соответственно, 0,12; 0,09 и 0,10.

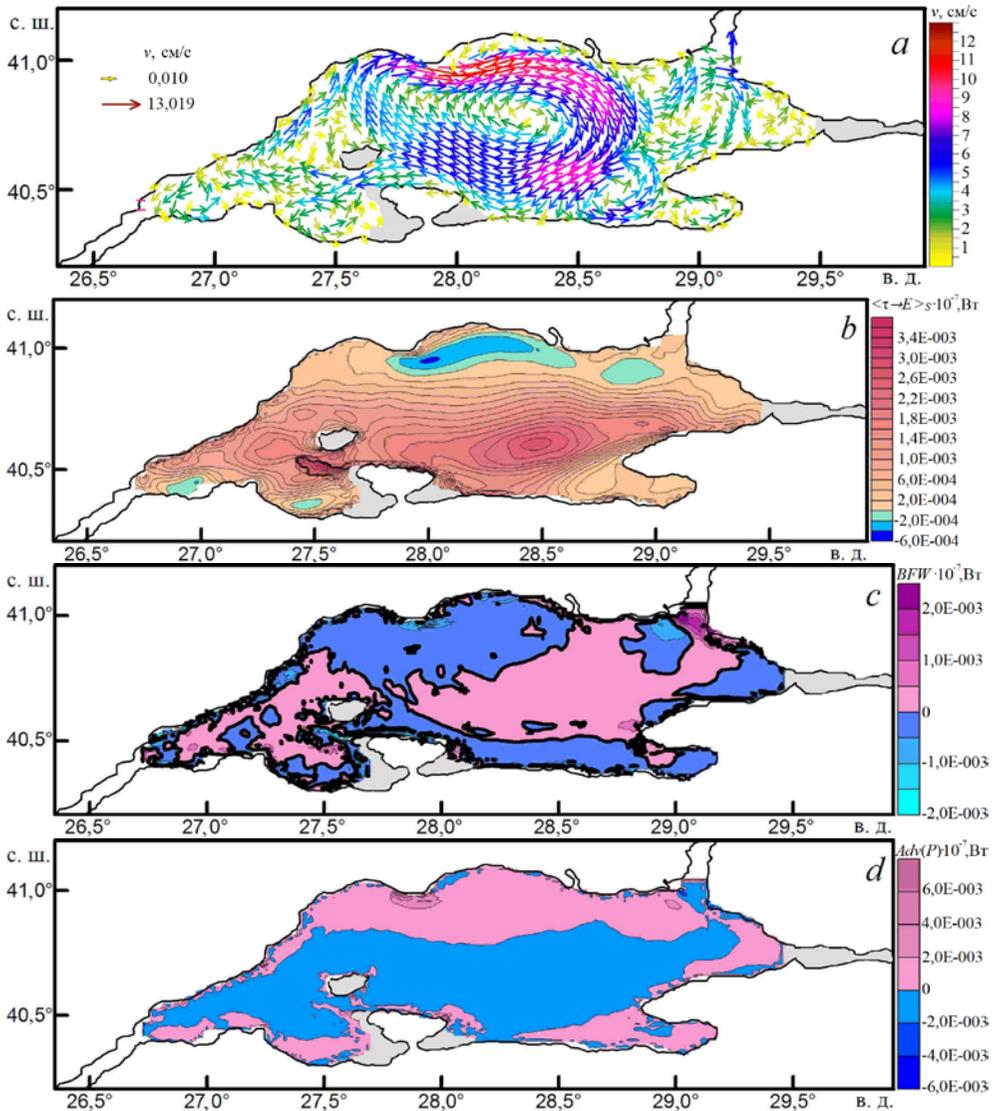
На рис. 2, *c* видно, что в прибрежных областях, соответствующих расположению циклонов, наблюдается отрицательная работа силы плавучести (здесь и далее на приводимых картах толстая изолиния соответствует нулевому значению и разделяет положительные и отрицательные величины). Большие вертикальные градиенты в поле плотности в этих районах моря, обусловленные поступлением вод отличной плотности, свидетельствуют об увеличении запаса доступной потенциальной энергии в этих вихрях и, тем самым, об их бароклинной структуре.

На рис. 2, *d* приведена карта распределения работы силы давления для зимнего сезона, на которой розовым цветом выделены области положительного вклада в бюджет КЭ. В области циклонического круговорота эта работа отрицательная, в районе антициклона – положительная, что свидетельствует о ее вкладе в скорость изменения КЭ в этих вихрях. В прибрежной части моря работа сил давления положительна. Тем самым формирование вихрей по периферии бассейна сопровождается пополнением КЭ за счет работы сил давления. Видимо, это обусловлено совместным эффектом бароклинности и рельефа дна [17, 18]. Влияние адвекции на бюджет КЭ по пространству (рис. 2, *e*) носит нерегулярный характер и на несколько порядков меньше, чем работа силы давления. Экстремумы в ее распределении соответствуют зонам набегания потока на неоднородности береговой черты (м. Бозбурун, м. Фанербахче, м. Фернер, м. Коджабурун на рис. 1).

Карта распределения диссипации по горизонтали (рис. 2, *f*) демонстрирует увеличение диссипации по периферии области, что естественно в силу условий прилипания нормальной составляющей скорости. Скорость изменения КЭ вследствие трения по вертикали имеет более сложный характер (рис. 2, *g*). Ее экстремальные значения наблюдаются в области Босфора и острова Мраморного. Указанные особенности соответствуют структуре поля ветра, это дает основание предположить, что вклад процессов перемешивания в этих зонах преобладает.

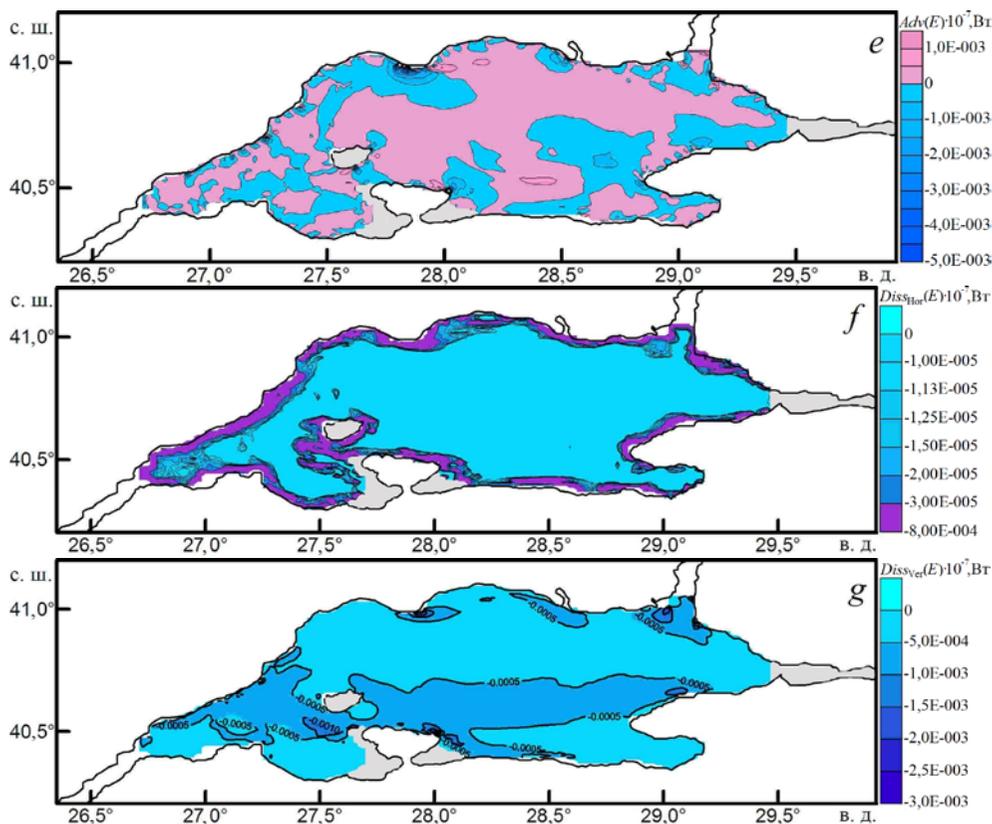
Весенний сезон. В весенний период в верхнем слое Мраморного моря сформировался обширный антициклонический круговорот (рис. 3, *a*) с максимальными значениями скорости до 13,02 см/с и R , равным 38 км

($Ro = 0,028 \ll 1$). Между антициклоном и берегом располагаются вихри с меньшими горизонтальными размерами. В прибосфорской части бассейна с центром в точке с координатами $29,00^\circ$ в. д., $40,75^\circ$ с. ш. образовался антициклон с $R = 15$ км и $Ro = 0,032$. В точках с координатами $26,91^\circ$ в. д., $40,40^\circ$ с. ш.; $27,40^\circ$ в. д., $40,35^\circ$ с. ш. и $28,85^\circ$ в. д., $40,91^\circ$ с. ш. располагаются центры циклонов, радиусы которых лежат в диапазоне от 4 до 6 км.



Р и с. 3. Карты средних за весенний гидрологический сезон полей скорости течения (векторы) (a), работы сил ветра (b), плавучести (c), давления (d), адвекции кинетической энергии (e), горизонтальной диссипации (f), вертикальной диссипации (g) (изолинии) в верхнем 20-метровом слое вод Мраморного моря

Fig. 3. Maps of the current velocity (vectors) (a), wind force (b), buoyancy (c), pressure (d), kinetic energy advection (e), horizontal dissipation (f) and vertical dissipation (g) (isolines) average fields in the upper 20-meter water layer of the Marmara Sea during the spring hydrological season



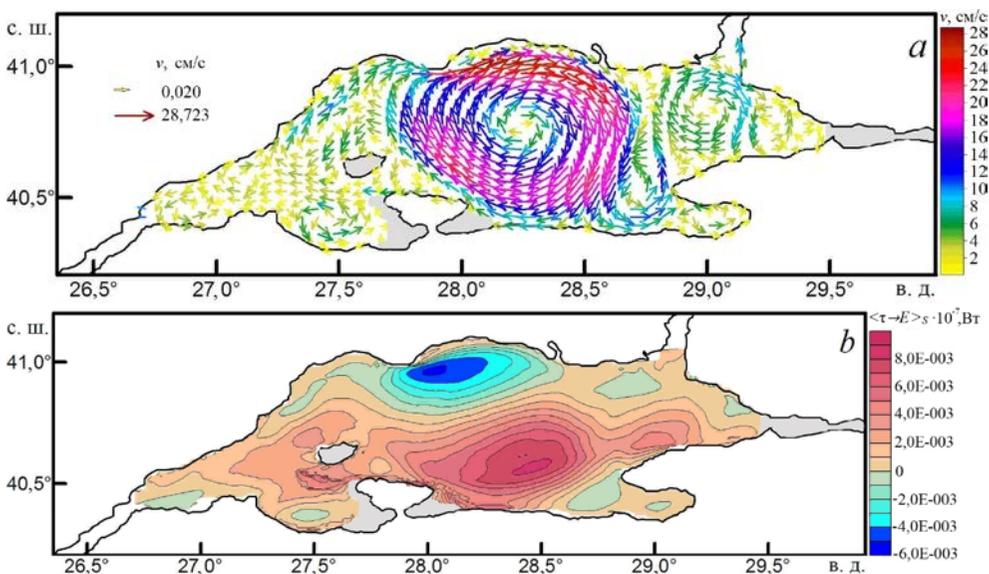
Если для центрального антициклона ветер является преобладающим фактором его образования (рис. 3, *b*), то для циклонических вихрей – его работа отрицательна, что свидетельствует о преобладающем влиянии на их формирование других сил. Действительно, работа силы плавучести в этих областях имеет локальные отрицательные экстремумы (рис. 3, *c*), поэтому резервуаром для поддержки интенсивности циклонических вихрей является доступная потенциальная энергия, что служит косвенным свидетельством влияния на прибрежную циркуляцию бароклинной неустойчивости.

Как и в зимний сезон, работа силы давления в прибрежной области моря имеет положительное значение (рис. 3, *d*), поэтому она увеличивает вихревую энергию. Адвекция КЭ по-прежнему носит нерегулярный знакопеременный характер (рис. 3, *e*) на неровностях береговой орографии в окрестностях мысов Фанербахче, Баба, Фернер, Корджабурун и у восточной оконечности п-ова Бандырма (рис. 1), где наблюдаются области экстремальных значений. В результате усиления прибрежных течений увеличились экстремумы, которые могут иметь значимый локальный эффект в энергетическом балансе.

Скорость изменения КЭ вследствие диссипации по горизонтали и вертикали в весенний сезон (рис. 3, *f, g*) качественно соответствует зимнему периоду. Имеют место количественные различия в величине вертикальной дисси-

пации, которые, возможно, связаны с прогревом поверхностных вод и, следовательно, более устойчивой вертикальной стратификацией.

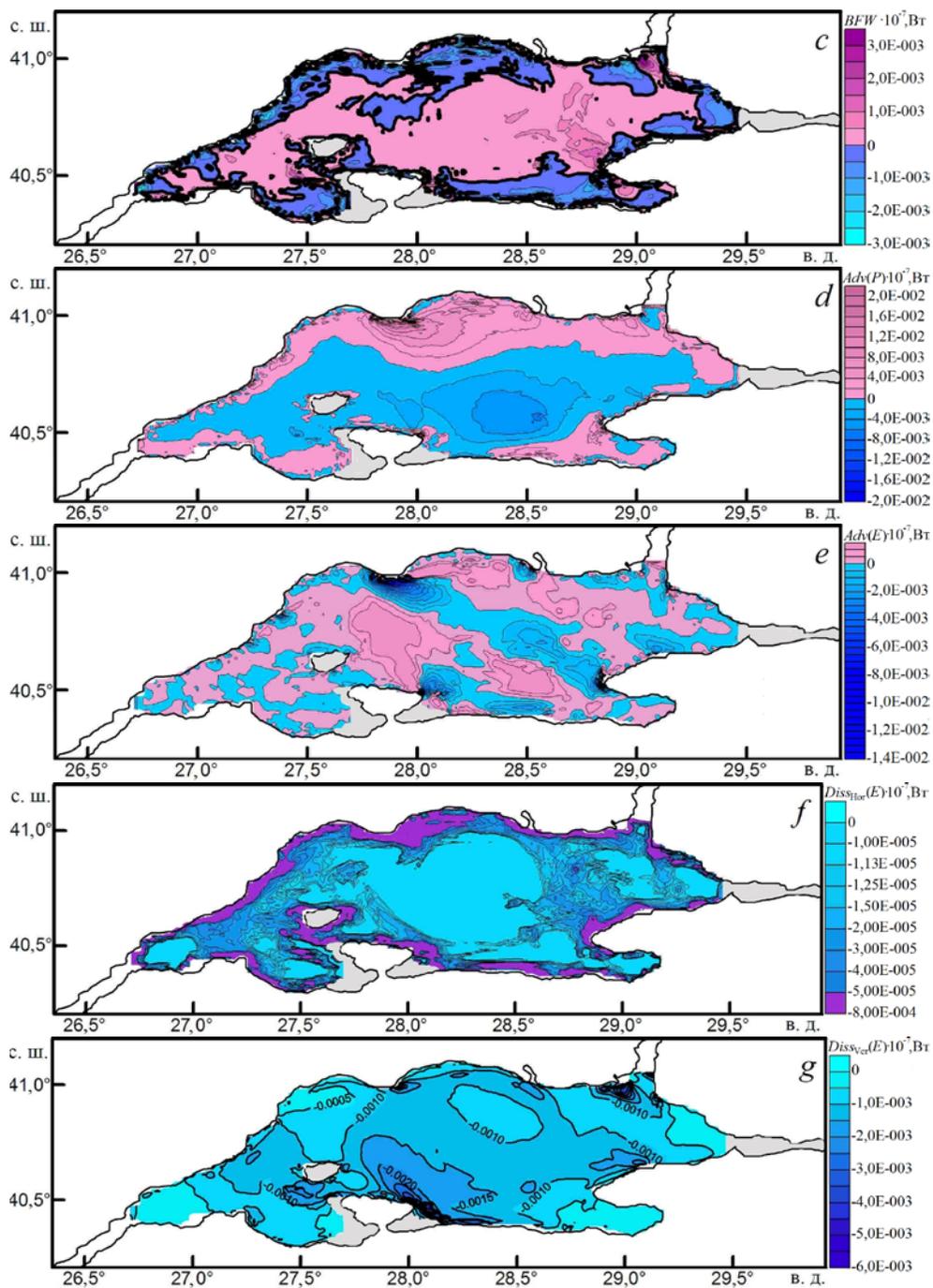
Летний сезон. В летний период в результате усиления ветра орбитальная скорость центрального антициклонического круговорота увеличилась в несколько раз и достигла ~ 29 см/с (рис. 4 *a, b*). По-прежнему наблюдаются циклонические вихри меньшего размера; антициклон, расположенный в северо-западном районе, слился с центральным вихрем, что повлияло на его мощность. Усилилась роль и работы силы плавучести, качественно соответствующей весеннему сезону, при этом возросли ее абсолютные значения по периферии бассейна (рис. 4, *c*). По-видимому, в связи с этим вихри стали носить более регулярный характер. Так же как и для весеннего сезона, работа силы давления практически во всей прибрежной области положительна (рис. 4, *d*) и поэтому увеличивает КЭ динамических структур в этих районах. Возросла роль адвекции КЭ (рис. 4, *e*). Поле адвекции КЭ имеет более регулярную структуру, отличную от структуры поля работы силы давления. Значительно возросла роль адвекции в локальном увеличении КЭ в области восточнее острова Мраморного, и в уменьшении КЭ в зонах влияния неоднородностей береговой черты на прибрежные течения. Потеря энергии вследствие горизонтальной диссипации в областях локальных экстремумов увеличилась примерно в два раза, что свидетельствует об усилении прибрежных течений (рис. 4, *f*). В то же время ускорилась потеря энергии в результате трения по вертикали, что демонстрирует рис. 4, *g*.



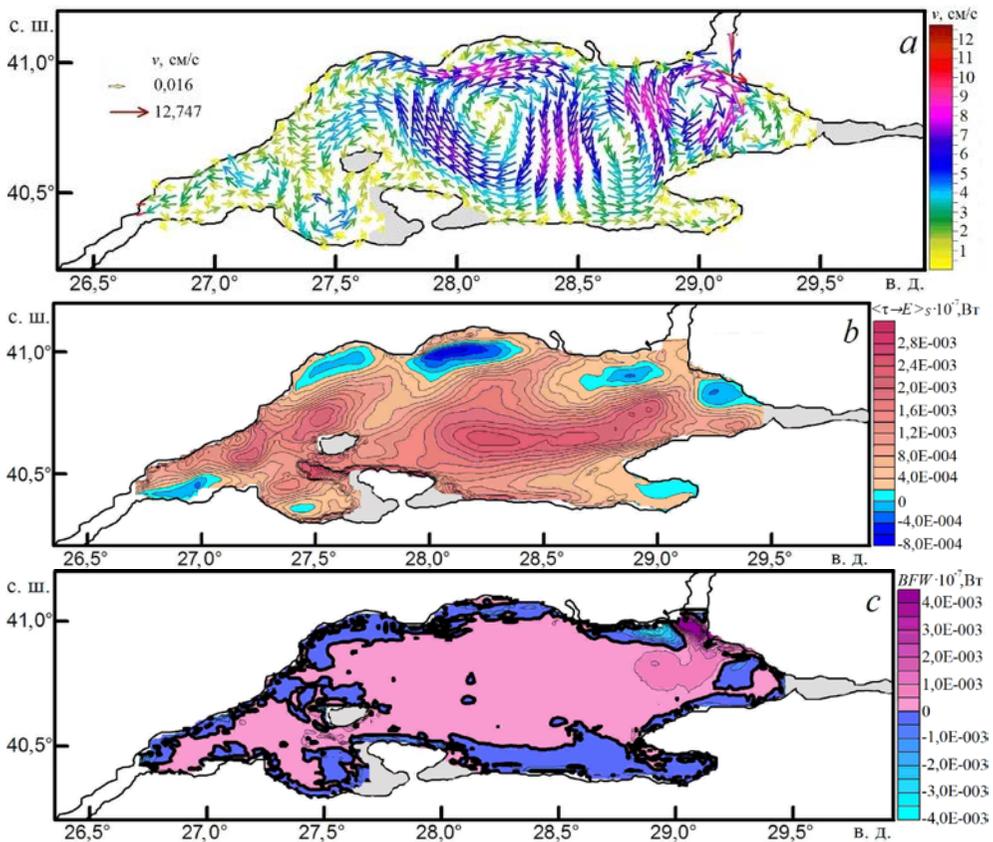
Р и с. 4. Карты средних за летний гидрологический сезон полей скорости течения (векторы) (*a*), работы силы ветра (*b*), плавучести (*c*), давления (*d*), адвекции кинетической энергии (*e*), горизонтальной диссипации (*f*), вертикальной диссипации (*g*) (изолинии) в верхнем 20-метровом слое вод Мраморного моря

Fig. 4. Maps of the current velocity (vectors) (*a*), wind force (*b*), buoyancy (*c*), pressure (*d*), kinetic energy advection (*e*), horizontal dissipation (*f*) and vertical dissipation (*g*) (isolines) average fields in the upper 20-meter water layer of the Marmara Sea during the summer hydrological season

Продолжение рис. 4
Continuation of Fig. 4

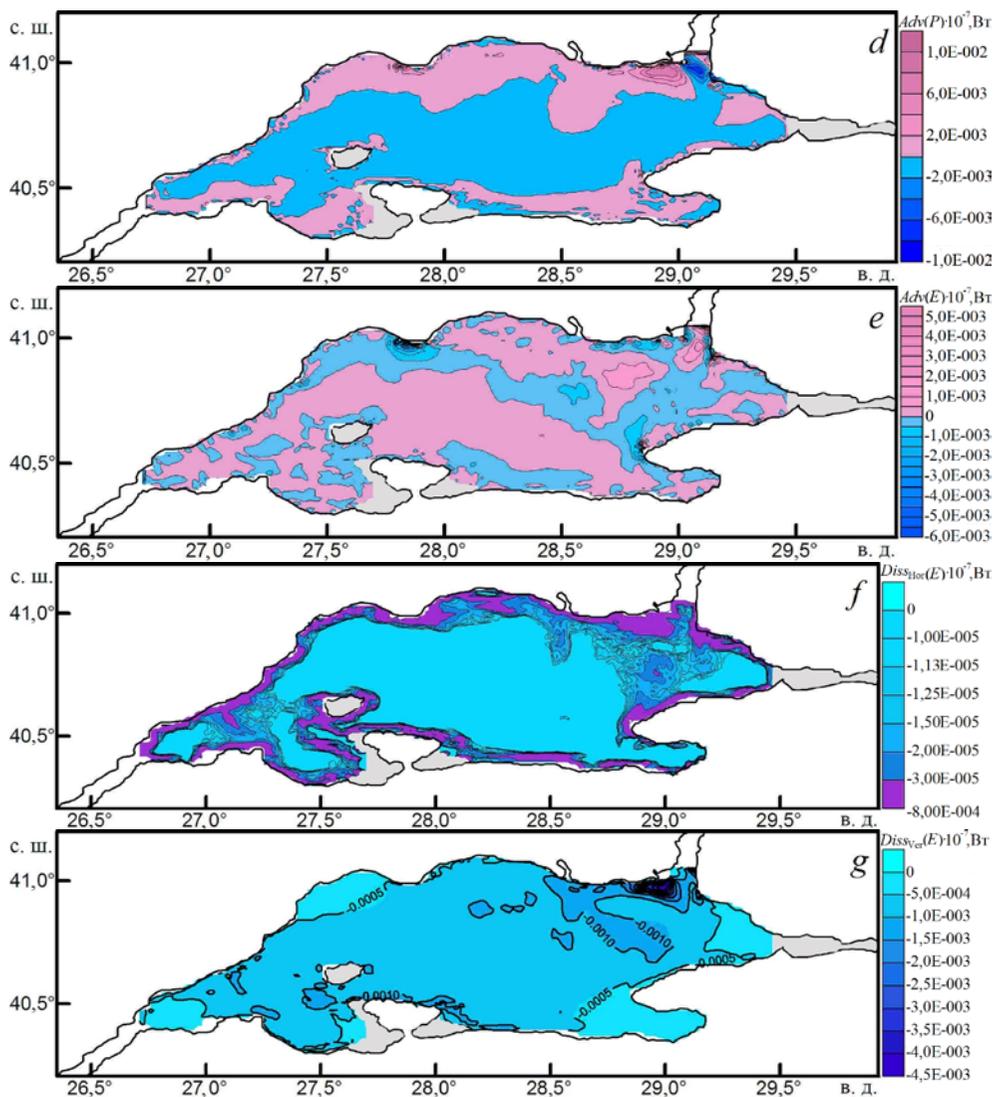


Осенний сезон. В осенний период центральный антициклон значительно деформируется, основную часть бассейна занимает цепочка из трех крупномасштабных вихрей: антициклон – циклон – антициклон. Сократилась площадь, занимаемая антициклоном в центре бассейна, и максимальная скорость течения при этом уменьшилась до 12,75 см/с (рис. 5, *a*). Вместе с тем увеличивается площадь циклона в юго-восточном районе моря, и его радиус теперь составляет около 22 км. Вихревая структура поля скорости соответствует распределению работы силы ветра (рис. 5, *b*), при этом в ней увеличилось (по сравнению с летним сезоном) количество областей отрицательных значений. Наличие этих областей свидетельствует о том, что в осенний сезон роль факторов, отличных от работы силы ветра, возрастает.



Р и с. 5. Карты средних за осенний гидрологический сезон полей скорости течения (векторы) (*a*), работы сил ветра (*b*), плавучести (*c*), давления (*d*), адвекции кинетической энергии (*e*), горизонтальной диссипации (*f*), вертикальной диссипации (*g*) (изолинии) в верхнем 20-метровом слое вод Мраморного моря

Fig. 5. Maps of the current velocity (vectors) (*a*), wind force (*b*), buoyancy (*c*), pressure (*d*), kinetic energy advection (*e*), horizontal dissipation (*f*) and vertical dissipation (*g*) (isolines) average fields in the upper 20-meter water layer of the Marmara Sea during the autumn hydrological season



По-прежнему пространственное распределение работы архимедовой силы имеет характерную структуру – положительные значения в центральной части моря и отрицательные на его периферии (рис. 5, с). В отличие от предыдущих сезонов работа архимедовой силы увеличивается. Видимо, охлаждение вод в прибрежной полосе к осени приводит к увеличению неоднородности поля плотности по вертикали.

В отличие от летнего сезона, в структуре поля работы силы плавучести наблюдается экстремум в районе Измитского залива. Наблюдаются также количественные изменения в пространственном распределении работы сил

давления и адвекции КЭ (рис. 5, *d, e*). По сравнению с летним периодом потеря энергии вследствие трения по горизонтали уменьшилась (рис. 5, *f*). Качественно структура поля трения осталась прежней – однородное поле в центральной области моря с локальными экстремумами по периферии. В отличие от летнего периода, в распределении потери энергии вследствие диссипации по вертикали остался один экстремум в области поступления босфорских вод (рис. 5, *g*).

Заключение

На основании проведенного численного эксперимента по моделированию циркуляции Мраморного моря были получены средние за гидрологические сезоны 2008 г. поля гидродинамических и энергетических характеристик. Анализ среднесезонных пространственных распределений полей скорости течения и составляющих бюджета КЭ показал, что вихри в верхнем слое моря в течение года формируются главным образом с помощью двух механизмов. В центральной части моря генерация крупномасштабного антициклона и его сезонная изменчивость определяются в основном работой силы ветра, а формирование и эволюция прибрежных циклонических круговоротов обусловлены работой силы плавучести.

Сезонная эволюция этих механизмов, которая имеет наибольшую интенсивность в прибрежной области моря, заключается скорее в их количественных изменениях. Анализ энергетических характеристик показал, что в структуре полей основных сил (плавучести, давления и трения) выделяются зоны локальных экстремумов. Две из них – районы поступления вод из проливов Босфор и Дарданеллы, в которых наблюдаются процессы формирования вихрей с горизонтальными масштабами от 3 до 15 км. Наибольшая изменчивость наблюдается в районе Босфора, что объясняется определяющим влиянием втекающих черноморских вод на сезонный характер мраморноморской циркуляции. Другие зоны экстремальных значений обусловлены неоднородностями береговой черты, что приводит к формированию прибрежных вихрей, источником энергии для которых наряду со сдвиговой неустойчивостью может являться доступная потенциальная энергия. Анализ полей работы силы плавучести подтверждает, что вдольбереговая зона является источником бароклинной неустойчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The circulation and hydrography of the Marmara Sea / S. T. Beşiktepe [et al.] // Progress in Oceanography. 1994. Vol. 34, iss. 4. P. 285–334. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0079-6611(94)90018-3)
2. Демьшев С. Г., Довгая С. В., Иванов В. А. Численное моделирование влияния обмена через проливы Босфор и Дарданеллы на гидрофизические поля Мраморного моря // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 4. С. 471–480.
3. Dynamics of the circulation in the Sea of Marmara: numerical modeling experiments and observations from the Turkish straits system experiment / J. Chiggiato [et al.] // Ocean Dynamics. 2012. Vol. 62, iss. 1. P. 139–159. <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0485-5>

4. *Zalesny V. B., Gusev A. V., Fomin V. V.* Numerical model of nonhydrostatic ocean dynamics based on methods of artificial compressibility and multicomponent splitting // *Oceanology*. 2016. Vol. 56, iss. 6. P. 876–887. <https://doi.org/10.1134/S0001437016050167>
5. *Sannino G., Sözer A., Özsoy E.* A high-resolution modelling study of the Turkish Straits System // *Ocean Dynamics*. 2017. Vol. 67, iss. 3–4. P. 397–432. <https://doi.org/10.1007/s10236-017-1039-2>
6. *Stanev E., Grashorn S., Zhang Y.* Cascading ocean basins: numerical simulations of the circulation and interbasin exchange in the Azov-Black-Marmara-Mediterranean Seas system // *Ocean Dynamics*. 2017. Vol. 67, iss. 8. P. 1003–1025. <https://doi.org/10.1007/s10236-017-1071-2>
7. Circulation of the Turkish Straits System under interannual atmospheric forcing / A. Aydoğdu [et al.] // *Ocean Science*. 2018. Vol. 14, iss. 5. P. 999–1019. <https://doi.org/10.5194/os-14-999-2018>
8. OSSE for a sustainable marine observing network in the Sea of Marmara / A. Aydoğdu [et al.] // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2018. Vol. 25, iss. 3. P. 537–551. <https://doi.org/10.5194/npg-25-537-2018>
9. *Демьшев С. Г.* Энергетика климатической циркуляции Черного моря. Ч. I. Дискретные уравнения скорости изменения кинетической и потенциальной энергий // *Метеорология и гидрология*. 2004. № 9. С. 65–80.
10. *Демьшев С. Г., Довгая С. В., Шокуров М. В.* Влияние потоков тепла, осадков и испарения на динамику поверхностных вод Мраморного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2016. № 3. С. 3–15. doi:10.22449/0233-7584-2016-3-3-15
11. *Демьшев С. Г., Довгая С. В., Шокуров М. В.* Энергетические характеристики циркуляции вод Мраморного моря в 2008 году // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 4. С. 307–321. doi:10.22449/0233-7584-2019-4-307-321
12. The Mediterranean Sea heat and mass budgets: Estimates, uncertainties and perspectives / G. Jordà [et al.] // *Progress in Oceanography*. 2017. Vol. 156. P. 174–208. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.07.001>
13. Modeling of Hydraulically Controlled Exchange Flow in the Bosphorus Strait / T. Oguz [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 1990. Vol. 20, iss. 7. P. 945–965. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1990\)020<0945:МОНСЕФ>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1990)020<0945:МОНСЕФ>2.0.CO;2)
14. *Запезалов А. С.* Сезонная изменчивость вертикальных распределений температуры и солености в Мраморном море // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 2. С. 78–84.
15. *Beşiktepe T. Ş.* Density currents in the two-layer flow: an example of Dardanelles outflow // *Oceanologica Acta*. 2003. Vol. 26, iss. 3. P. 243–253. [https://doi.org/10.1016/S0399-1784\(03\)00015-X](https://doi.org/10.1016/S0399-1784(03)00015-X)
16. *Каменкович В. М., Кошляков М. Н., Монин А. С.* Синоптические вихри в океане. Л. : Гидрометеиздат, 1987. 509 с.
17. *Саркисян А. С., Иванов В. Ф.* Совместный эффект бароклинности и рельефа дна как важный фактор в динамике морских течений // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 1971. Т. 7, № 2. С. 173–188.
18. *Саркисян А. С.* Сорок лет открытию роли совместного эффекта бароклинности и рельефа дна в моделировании климатических характеристик океана // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2006. Т. 42, № 5. С. 582–603.

Об авторах:

Демьшев Сергей Германович, главный научный сотрудник, заведующий отделом теории волн, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5405-2282**, demyshev@gmail.ru

Довгая Светлана Владимировна, младший научный сотрудник, отдел теории волн, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-3122-5053**, dovgayasvetlana0309@yandex.ru