

Энергетические характеристики циркуляции вод Мраморного моря в 2008 году

С. Г. Демьшев, С. В. Довгая*, М. В. Шокуров

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: dovgayasvetlana0309@yandex.ru*

Поступила в редакцию 30.01.2019 г., после доработки – 12.03.2019 г.

Цель. Главными задачами данных исследований были проведение анализа энергетики Мраморного моря и определение основных причин формирования особенностей его циркуляции в 2008 г.

Методы и результаты. На основе вихреразрешающей нелинейной гидродинамической модели Морского гидрофизического института (МГИ) проведен численный эксперимент по моделированию циркуляции Мраморного моря и расчету ее энергетических характеристик на примере 2008 г. Разрешение модели по горизонтали составило $1,22 \times 0,83$ км, по вертикали использовалось 18 горизонтов, шаг по времени – 0,5 мин. Температура, соленость и расход воды через проливы Босфор и Дарданеллы задавались в соответствии с доступными данными измерений. Используемые поля атмосферного воздействия были получены из расчета по региональной атмосферной модели MM5. Проанализированы проинтегрированные по объему и осредненные за год вклады слагаемых в уравнениях бюджета кинетической и потенциальной энергий. Основными факторами изменения кинетической энергии Мраморного моря были работа силы плавучести, ветер, вертикальное и горизонтальное перемешивание. Анализ средних по объему слагаемых в уравнении скорости изменения кинетической энергии показал, что приток энергии от ветра в основном компенсировался трением по вертикали, работа силы плавучести – трением по горизонтали. Изменение потенциальной энергии в среднем за год происходило преимущественно за счет ее горизонтального переноса, обусловленного воздействием течений в предпроливных областях моря, вертикальной диффузии и работы силы плавучести. По результатам анализа энергетических переходов получено, что в верхнем слое моря мезомасштабные вихри могут формироваться непосредственно под влиянием ветра и в результате бароклиной неустойчивости течений. На генерацию субмезомасштабных круговоротов в прибрежных районах влияние оказывали процессы бароклиной неустойчивости. В прибофорском районе в результате втока менее плотных черноморских вод наблюдалось усиление горизонтальных градиентов в поле плотности и как следствие – интенсификация динамических процессов.

Выводы. Изучение энергетических характеристик циркуляции вод Мраморного моря позволило заключить, что бароклиная неустойчивость и ветер являются одними из основных источников вихреобразования в этом бассейне.

Ключевые слова: численная гидродинамическая модель, Мраморное море, кинетическая энергия, потенциальная энергия, циклон, антициклон, бароклиная неустойчивость.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0003 «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., 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

Energy Characteristics of the Marmara Sea Water Circulation in 2008

S. G. Demyshev, S. V. Dovgaya*, M. V. Shokurov

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

*e-mail: dovgayasvetlana0309@yandex.ru

Purpose. The main objectives of the study consisted in analyzing the Marmara Sea energy and in identifying the basic reasons for formation of its circulation features in 2008.

Methods and Results. The numerical experiment on modeling the Marmara Sea circulation and evaluating its energy characteristics on the example of 2008 was carried out based on the eddy-resolving nonlinear hydrodynamic model of Marine Hydrophysical Institute, RAS. The horizontal resolution of the model was 1.22×0.83 km, 18 horizons were used over vertical and the time step was 0.5 min. Temperature, salinity and water discharge through the Bosphorus and the Dardanelles were preset according to the available measurement data. The applied fields of atmospheric forcing were obtained from the calculation by the regional atmospheric model MM5. The volume-integrated and year-averaged contributions of the terms in the equations of the kinetic and potential energy budgets were analyzed. The basic factors of change in the Marmara Sea kinetic energy consisted in the buoyancy force action, wind, and vertical and horizontal mixing. Having been analyzed, the volume-average summands in the equation of rate of the kinetic energy change have shown that the wind-induced energy influx was compensated mainly by vertical friction, and the buoyancy force action – by horizontal friction. On the average, in course of a year the potential energy changed mainly due to its horizontal transport conditioned by the effect of the currents located in front of the straits, vertical diffusion and the buoyancy force impact. The results of analysis of the energy transitions permitted to reveal that in the upper sea layer, the mesoscale vortices were formed directly under the wind influence and as a result of the currents' baroclinic instability. Generation of the sub-mesoscale vortices in the coastal regions was affected predominantly by the processes of baroclinic instability. In the region near the Bosphorus, increase of the horizontal gradients in the density field and, consequently, intensification of dynamic processes are the results of inflow of the Black Sea waters with lower density.

Conclusions. Study of the energy characteristics of the Marmara Sea water circulation permitted to conclude that baroclinic instability and wind are two of the basic sources of eddy formation in this basin.

Keywords: numerical hydrodynamic model, Marmara Sea, kinetic energy, potential energy, cyclone, anticyclone, baroclinic instability.

Acknowledgments: The investigation is carried out within the framework of the state task on theme № 0827-2018-0003 "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., Dovgaya, S.V. and Shokurov, M.V., 2019. Energy characteristics of the Marmara Sea water circulation in 2008. *Physical Oceanography*, [e-journal] 26(4), pp. 275-287. doi:10.22449/1573-160X-2019-4-275-287

Введение

Численное моделирование циркуляции вод Мраморного моря является одной из составляющих реконструкции термогидродинамических характеристик Средиземноморского региона. Работы по моделированию циркуляции Мраморноморского бассейна немногочисленны. Общие закономерности вертикального распределения вод этого бассейна с помощью упрощенной боксовой модели приведены в [1]. В работе [2] на основе применения численной нелинейной трехмерной модели МГИ с высоким пространственным разрешением установлены струйный характер *S*-образного течения в верхнем слое

моря и периодическое проявление около северной границы моря циклонического вихря. Формирование особенностей циркуляции вод под воздействием атмосферных потоков тепла, влаги и испарения изучается в [3]. В [4] воспроизводятся особенности циркуляции в сентябре – декабре 2008 г. и феврале – марте 2009 г. на основе применения численной модели *ROMS*. Показано, что ветер и обмен через проливы влияют на смещение пикноклина в разных частях бассейна. Численное моделирование динамики вод системы турецких проливов, включающей пролив Босфор, Мраморное море и пролив Дарданеллы, с использованием неструктурированной сетки и заданием реального атмосферного возмущения в период 2009–2013 гг. представлено в работе [5], где указаны возможные механизмы блокировки потоков вод из пролива Босфор. Структура гидрофизических полей вод Мраморного моря за сентябрь и декабрь 2013 г. на примере алгоритма решения трехмерных уравнений гидродинамики океана без приближения гидростатики и упрощения ускорения Кориолиса приведена в работе [6]. В ней показана близость гидрофизических полей моря, рассчитанных в режимах гидростатической и негидростатической динамик. Некоторые отличия наблюдаются на склонах дна, где увеличивается интенсивность течений. Остается открытым вопрос о том, какой механизм является преобладающим в формировании полученных особенностей циркуляции вод Мраморного моря. Основные факторы, определяющие динамику в бассейне, – атмосферное воздействие и обмен массой, теплом, солью и энергией через проливы. Для оценки их вклада целесообразно использовать энергетический метод, который заключается в расчете и анализе бюджета кинетической (КЭ) и потенциальной (ПЭ) энергий.

Для точности расчета энергетического бюджета необходимо, чтобы дискретные уравнения скорости изменения КЭ и ПЭ соответствовали конечно-разностным уравнениям численной модели динамики. Такие уравнения были получены в [7], на их основе проведен анализ климатической циркуляции вод Черного моря и описаны энергетические циклы в районах с наибольшей изменчивостью течений. С учетом реального воздействия атмосферы в работе [8] на основе энергетического анализа исследовалась внутригодовая изменчивость полей температуры, солености и скорости течений в Черном море. На примере 2006 г. показано, что определяющими факторами для различных сезонов являлись влияние ветра, работа силы плавучести и турбулентный обмен по вертикали. В зимний период решающим было воздействие ветра, весной и летом – сила плавучести и турбулентное перемешивание по вертикали.

В данной работе с применением аналогичной методики [8] проведен анализ энергетики Мраморного моря и на его основе установлены причины, определяющие особенности циркуляции моря в 2008 г.

Постановка задачи и параметры

Используемые уравнения модели подробно представлены в [3]. Разрешение модели по оси x – 1,22 км, по оси y – 0,83 км. Выбор высокого разрешения по горизонтали позволяет воспроизводить субмезомасштабные особенности течений, которые могут оказать заметный вклад в изменчивость циркуляции моря. Горизонты по вертикали 2,5; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 62,5; 75; 100; 150; 300; 500; 700; 900; 1100 м, шаг по времени – 0,5 мин.

В проливах Босфор и Дарданеллы скорости течений рассчитывались по представленным в [1, 3] расходам: в верхнем слое Босфора (0–20 м) – 650 км³/год, в нижнем слое (20–100 м) – 350 км³/год; в верхнем (0–20 м) и нижнем (20–75 м) слоях пролива Дарданеллы – 830 и 530 км³/год соответственно. Температура воды, поступающей из пролива Босфор, изменялась по глубине и со временем в пределах 8–23,5°C, соленость – в диапазоне 21–30‰ по глубине [9]. Воды, поступающие в Мраморное море через пролив Дарданеллы, имели постоянную и равную 14,6°C температуру, соленость же с глубиной изменялась в диапазоне 34,5–38,68‰ [10–12].

Параметризация процессов турбулентного обмена импульсом и турбулентной диффузии по вертикали осуществлялась с использованием аппроксимации Пакановского – Филандера [13]. Значения соответствующих параметров [3] в этом представлении были получены на основе численных экспериментов, в которых результаты расчетов сопоставлялись с известными из наблюдений особенностями расположения границы раздела двух водных масс бассейна. Коэффициенты турбулентной вязкости и турбулентной диффузии по горизонтали принимали соответственно следующие значения: $\nu_H = 5 \cdot 10^{14}$ см⁴/с, $\kappa^H = 5 \cdot 10^{14}$ см⁴/с.

Средние ежесуточные поля тангенциального напряжения трения ветра, потоки тепла, осадки и испарение за 2008 г., которые задаются как граничные условия на поверхности моря, взяты из расчета по региональной атмосферной модели *Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model* версия 3.7 (MM5) (<http://www.ucar.edu/mm5/mm4/home.html>).

На дне для составляющих скорости принимались условия прилипания и отсутствия потоков тепла и соли. На твердых боковых стенках выполнялось равенство нулю нормальных составляющих скорости и условие скольжения для другой составляющей, а также условие отсутствия потоков тепла и соли через твердые участки границы. В проливах на втоке (верхнебосфорское и нижнедарданельское течения) задавались скорости потоков и значения температуры и солености, на вытоке (нижнебосфорское и верхнедарданельское течения) – скорости в проливах и равенство нулю производных температуры и солености [3].

Начальные поля для горизонтальных скоростей течений, солености, температуры и уровня соответствовали 28 августа (6620-е сутки счета), они были получены в работе [2] в эксперименте с такими же параметрами, что и в данной работе, но без учета атмосферного воздействия. Длительный период интегрирования был обусловлен установлением течений в нижних слоях моря. Расчет гидродинамических характеристик проводился в период 1 января – 31 декабря 2008 г.

Подробный вывод и анализ свойств дискретных уравнений бюджета КЕ и ПЕ представлены в работах [7, 8]. Приведем общий вид используемых уравнений и выражений для их составляющих. Полагая, что КЕ в квазистатистическом приближении выражается как $E = \rho_0(u^2 + v^2)/2$, уравнение ее бюджета в символическом представлении запишем в виде

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

При этом работа сил давления и адвекция КЭ имеют вид

$$Adv(P + E) = \left(u(g\zeta + E + P') \right)_x + \left(v(g\zeta + E + P') \right)_y + \left(w(g\zeta + E + P') \right)_z. \quad (2)$$

Работа силы плавучести, приток энергии от ветра, диссипация КЭ вследствие вертикального и горизонтального внутреннего трения выражаются соответственно следующим образом [7]:

$$BFW = g\rho w, \quad (3)$$

$$F_{Bfr}^{\tau}(E) = v_V (uu_z + vv_z)_z, \quad (4)$$

$$Diss_{Ver}(E) = v_V (u_z^2 + v_z^2), \quad (5)$$

$$Diss_{Hor}(E) = v_H \left((\nabla^2 u)^2 + (\nabla^2 v)^2 \right). \quad (6)$$

Интегрирование (1) по объему дает

$$\begin{aligned} \langle E_t \rangle_v + \langle Adv(E) \rangle_v + \langle Adv(P) \rangle_v = \langle BFW \rangle_v + \langle \tau \rightarrow E \rangle_s - \\ - \langle Diss_{Ver}(E) \rangle_v - \langle Diss_{Hor}(E) \rangle_v. \end{aligned} \quad (7)$$

В (7) для удобства анализа выделено отдельно слагаемое $\langle \tau \rightarrow E \rangle_s$, описывающее приток от ветрового воздействия, а вклад от $F_{Bfr}^{\tau}(E)$ за счет граничного условия на дне внесен в $\langle Diss_{Ver}(E) \rangle_v$. Адвективные слагаемые в левой части уравнения (7) не равны нулю и зависят, в том числе, и от водообмена через проливы.

Учитывая, что потенциальная энергия равна $\Pi = -g\rho z$, ее изменение представляется следующим образом:

$$\begin{aligned} \Pi_t + Adv(\Pi) = -BFW - Diff_{Hor}^{fc}(\Pi) + Diff_{Ver}^{fc\ Fluxes}(\Pi) + Diff_{Ver}^{fc\ Bot-Sur}(\Pi) - \\ - Diff_{Ver}^{k^V}(\Pi) - Diff_{Ver}^{Add}(\Pi), \end{aligned} \quad (8)$$

где $Adv(\Pi)$ – адвекция потенциальной энергии; $Diff_{Hor}^{fc}(\Pi)$ – изменение ПЭ, определяемое горизонтальной диффузией; $Diff_{Ver}^{fc\ Fluxes}(\Pi)$ – изменение ПЭ, обусловленное потоками плавучести через поверхность моря и ее вертикальной внутренней диффузией; $Diff_{Ver}^{fc\ Bot-Sur}(\Pi)$ – изменение ПЭ за счет разницы между придонной и поверхностной плотностью; $Diff_{Ver}^{k^V}(\Pi)$ – изменение ПЭ вследствие турбулентного перемешивания по глубине; $Diff_{Ver}^{Add}(\Pi)$ – добавка, вносимая как результат нелинейной зависимости плотности морской воды от температуры и солености. Слагаемые в левой и правой частях уравнения (8) представляются в следующем виде [7]:

$$Adv(\Pi) = (u\Pi)_x + (v\Pi)_y + (w\Pi)_z, \quad (9)$$

$$Diff_{Hor}^{fc}(\Pi) = k^H (\nabla^2 \Pi - gzQ^H), \quad (10)$$

$$Diff_{Ver}^{fc\ Fluxes}(\Pi) = g(k^V z\rho_z)_z, \quad (11)$$

$$Diff_{Ver}^{Bot-Sur}(\Pi) = g(k^V \rho)_z, \quad (12)$$

$$Diff_{Ver}^{k^V}(\Pi) = gz(k^V)_z \rho. \quad (13)$$

В формулах (2) – (6) и (9) – (13) введены следующие обозначения [7]: u, v, w – компоненты вектора скорости, направленные вдоль осей x, y, z соответственно; g – ускорение свободного падения; ζ – возвышение свободной по-

верхности; ρ – плотность морской воды; $P' = g \int_0^z \rho d\mu$; ν_V – коэффициент вертикальной турбулентной вязкости; k^V – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии; Q^H – дополнительное слагаемое, обусловленное нелинейностью уравнения состояния.

В результате интегрирования уравнения (8) по объему получим

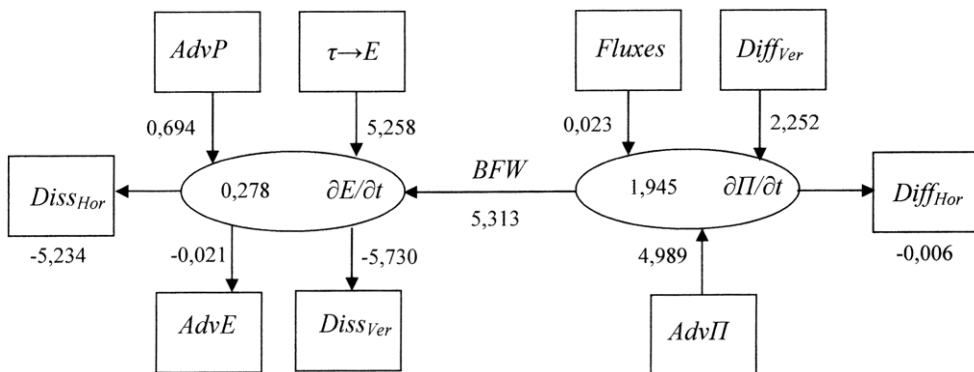
$$\begin{aligned} \langle \Pi_t \rangle_V + \langle Adv(\Pi) \rangle_V = - \langle BFW \rangle_V - \langle Diff_{Hor}(\Pi) \rangle_V + \\ + \langle Diff_{Ver}(\Pi) \rangle_V + \langle Fluxes \rangle_S, \end{aligned} \quad (14)$$

где слагаемое $\langle Diff_{Ver}(\Pi) \rangle_V$ включает в себя сумму проинтегрированных по объему четвертого, пятого и шестого слагаемых в правой части уравнения (8) и внутреннюю вертикальную диффузию. Также для удобства анализа в (14) отдельным слагаемым $\langle Fluxes \rangle_S$ выделено изменение ПЭ, которое обусловлено наличием потоков плавучести на поверхности моря. В формулах (7) и (14) индекс V указывает на интегрирование по объему бассейна, индекс S – на интегрирование по его поверхности.

Результаты численного эксперимента

Проведенный расчет позволил получить трехмерные поля гидродинамических и энергетических характеристик циркуляции вод Мраморного моря на каждые сутки 2008 г. В рассмотренных выше уравнениях бюджета кинетической (7) и потенциальной (14) энергий слагаемые были проинтегрированы по объему и осреднены за год. Схема, на которой приведены величины и направления переноса энергетических потоков, показана на рис. 1. Угловые скобки в записи слагаемых из уравнений (7) и (14) здесь и далее опущены. Положительное значение величины BFW указывает на переход из доступной потенциальной энергии в кинетическую. Из рис. 1 видно, что увеличение КЭ в среднем за 2008 г. в основном обусловлено работой силы плавучести и притоком энергии от ветра. Их вклад компенсировался преимущественно диссипацией энергии по горизонтали и вертикали. Работа сил давления также увеличивала КЭ, но ее воздействие на порядок меньше BFW и $\tau \rightarrow E$. Адвекция кинетической энергии ($Adv(E)$) влияла незначительно, ее величина на два порядка меньше основных источников увеличения КЭ. В среднем за год наблюдалось увеличение КЭ. На изменение ПЭ основное влияние оказывали работа силы плавучести, адвекция потенциальной энергии и вертикальная диффузия. Увеличение ПЭ в системе в среднем за год происходило преимущественно за счет ее адвекции. Этот эффект обусловлен втоком более пресных вод из пролива Босфор. Заметим, что адвективные слагаемые изменения КЭ и ПЭ

в проливах Босфор и Дарданеллы определяются в том числе и внутренней динамикой моря. Потoki плавучести на поверхности и горизонтальная диффузия на изменение ПЭ влияли незначительно. Вклад в ПЭ от изменения уровня происходит через вклад адвективного слагаемого. Его представление содержит u и v , которые, в свою очередь, определяются через $P = g\rho_0\zeta + P'$. В среднем за 2008 г. ПЭ увеличивается.



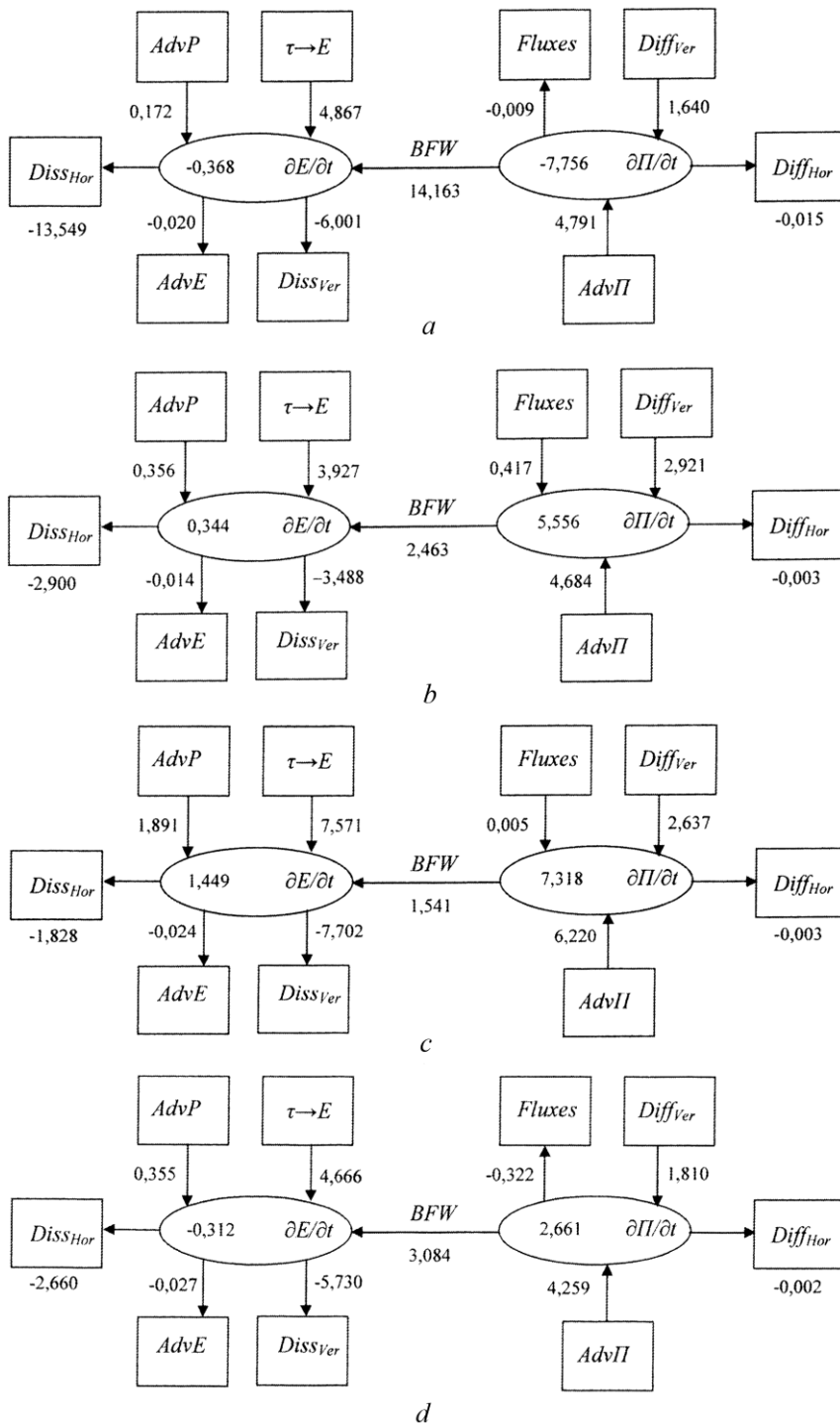
Р и с. 1. Энергетическая схема осредненных за 2008 г. значений слагаемых ($Вт \cdot м^{-3}$), которые для удобства записи увеличены в 10^6 раз, в уравнениях (7) и (14)

F i g. 1. Energy scheme of the summands' values averaged for 2008 ($W \cdot m^{-3}$) which, for the convenience of writing down, are increased by 10^6 times in equations (7) and (14)

Блок-схема на рис. 1 показывает возрастание суммарной энергии, что обусловлено разницей между поступлением и стоком энергии. Влияние учтенного атмосферного воздействия описывается двумя членами: $\tau \rightarrow E$ и $Fluxes$. Приток энергии от ветра почти полностью компенсируется вертикальным трением, потоки плавучести на поверхности малы. Поэтому кажется неочевидным, что учет непосредственного влияния атмосферы автоматически приводит к среднегодовому увеличению полной энергии.

Рассмотрим распределение энергетических потоков в гидрологические сезоны года (рис. 2). Для этого значения проинтегрированных по объему слагаемых в уравнениях (7) и (14) были осреднены по этим периодам. Зимний, весенний, летний и осенний гидрологические сезоны предполагают трехмесячные промежутки времени, которые начинаются с 1 января, 1 апреля, 1 июля, 1 октября соответственно.

Как видно из рис. 2, основной баланс в изменении КЭ во все сезоны обеспечивался четырьмя слагаемыми – работой силы плавучести, диссипацией энергии по горизонтали, притоком энергии от ветра и турбулентным перемешиванием по вертикали. Сравнивая знаки и порядки этих величин, можно заключить, что работа силы плавучести в основном компенсируется трением по горизонтали, поступление энергии от ветра – трением по вертикали. Работа сил адвекции была на порядок меньше. Для скорости изменения ПЭ основной баланс соблюдался между турбулентным перемешиванием по вертикали, силой плавучести и адвекцией ПЭ. Диффузия по горизонтали и потоки плавучести на поверхности моря оказались на несколько порядков меньше.



Р и с. 2. Энергетические схемы осредненных за зимний (а), весенний (b), летний (c) и осенний (d) гидрологические сезоны 2008 г. значений слагаемых ($Вт \cdot м^{-3}$), которые для удобства записи увеличены в 10^6 раз, в уравнениях (7) и (14)

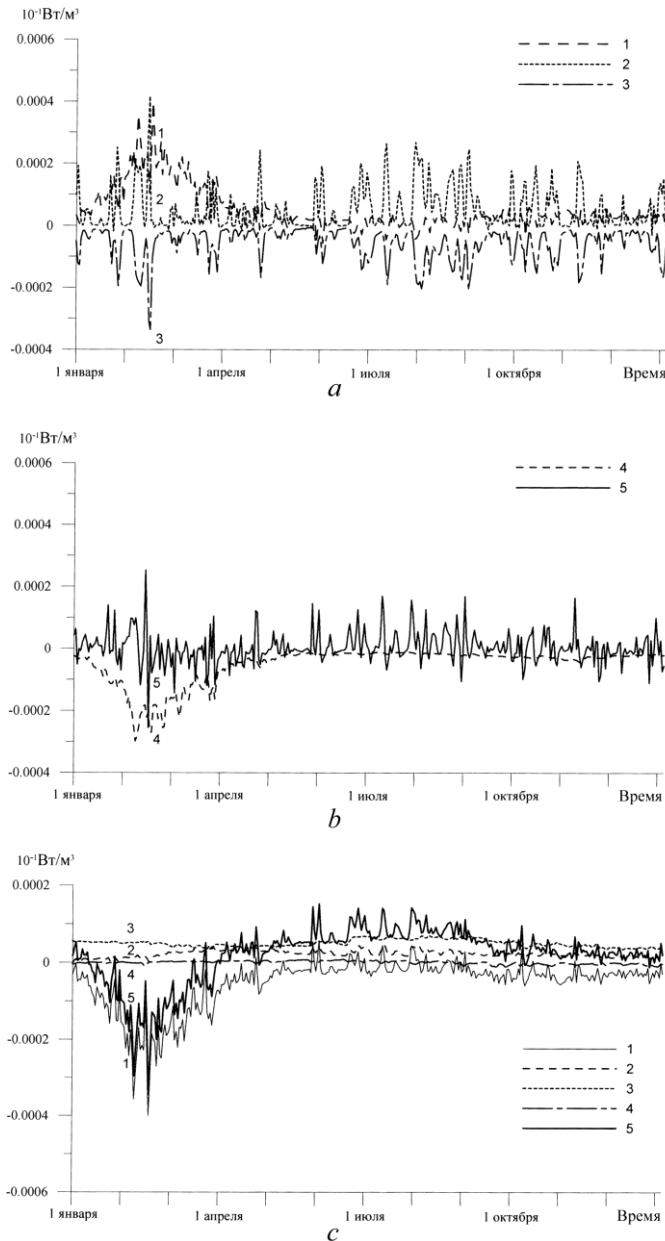
Fig. 2. Energy schemes of the summands' values averaged for the winter (a), spring (b), summer (c) and autumn (d) hydrological seasons, 2008, ($W \cdot m^{-3}$) which, for the convenience of writing down, are increased by 10^6 times in equations (7) and (14)

В зимний период 2008 г. наблюдался наибольший поток от ПЭ к КЭ (рис. 2, *a*). Приток энергии от ветра был в 2,9 раза меньше, чем от *BFW*. Вклад от силы плавучести в этот период оказался в 5,7 раза больше, чем весной (рис. 2, *b*) и в 9,2 раза больше по сравнению с летним периодом (рис. 2, *c*). В летний сезон наблюдался наибольший приток энергии от ветра и наименьший – в результате работы силы плавучести (рис. 2, *c*). Скорость изменения и КЭ, и ПЭ была отрицательной в зимний сезон (рис. 2, *a*) и положительной – в остальное время года (рис. 2, *b – d*). Наибольший рост ПЭ наблюдался в летний период, а ее уменьшение происходило зимой (рис. 2, *a, c*). Приведенные диаграммы демонстрируют важную роль в среднесезонном и, как следствие, в среднегодовом балансе адвекции потенциальной энергии. Анализ пространственного распределения этой характеристики показывает, что ее величину преимущественно определяет вток воды через пролив Босфор. Отсюда следует, что для адекватного воспроизведения циркуляции Мраморного моря необходимо с высокой степенью точности учитывать влияние вод, поступающих из этого пролива.

Проанализируем внутригодовую изменчивость проинтегрированных по объему энергетических потоков бассейна Мраморного моря. На рис. 3 представлены графики изменения со временем тех слагаемых из уравнений (7) и (14), вклад которых, принимая во внимание схему на рис. 1, наиболее весом. Наибольший приток в КЭ происходил от *BFW* в феврале – апреле (кривая 1 на рис. 3, *a*). В этот период произошло ослабление зимних ветров (кривая 2 на рис. 3, *a*) и преобладал вклад от работы силы плавучести. Поступление энергии от ветра возрастало при воздействии интенсивных штормовых ветров в следующие периоды 2008 г.: 24–30 января, 8–12 февраля, 25 апреля – 1 мая, 12–14 июля, 30 июля – 4 августа, 22–24 и 27–29 августа, 1–4 сентября, 4–6 октября, 10–25 ноября. В результате средний за лето приток энергии от ветра в 1,5–2 раза больше, чем в другие сезоны (рис. 2). Поведение кривых 1 и 2 на рис. 3, *a* свидетельствует о том, что приток энергии от ветра в основном компенсировался трением по вертикали (кривые 1 и 3 на рис. 3, *a*). Величина $Diss_{ver}(E)$ формируется в результате воздействия трения о дно и внутреннего вертикального трения. Зависимость вертикальной диссипации от трения о дно несущественна на всем рассматриваемом временном интервале. Поэтому основную роль в этом балансе играет внутреннее трение. Средняя по объему работа силы плавучести компенсируется горизонтальной диссипацией (кривые 2 и 4 на рис. 3, *a, b*). Локальная производная по времени от КЭ коррелирует с притоком энергии от ветра (кривые 2 и 5 на рис. 3, *a, b*), который, в свою очередь, находится в противофазе с диссипацией по вертикали (кривые 2 и 3 на рис. 3, *a*). Это соответствует структуре энергетических потоков на диаграмме (рис. 2, *a*). Поэтому, несмотря на значительный вклад работы силы плавучести в изменение КЭ, в среднем по пространству основную роль здесь играет разница между поступлением энергии от ветра и трением по вертикали.

Графики, отражающие изменение со временем наиболее значимых слагаемых из уравнения бюджета ПЭ (14), приведены на рис. 3, *c*. Сравнивая кривые 1 (*BFW*) и 5 ($\partial\Pi/\partial t$), можно заключить, что основной вклад в изменение ПЭ вносила работа силы плавучести – положительная величина *BFW* уменьшала ПЭ и увеличивала КЭ. На протяжении года величина $Adv(\Pi)$ (кривая 3 на рис. 3, *c*) была приблизительно положительной и постоянной, и поэтому ее положительный вклад оказался в среднегодовом и средних за сезоны балансах (диаграммы на рис. 1 и 2). Диффузия по вертикали (кривая 2 на рис. 3, *c*) на протяжении года была

также неотрицательной и тем самым увеличивала вклад в увеличение ПЭ. Влияние потоков плавучести через поверхность моря в течение года изменяется незначительно (кривая 4 на рис. 3, *c*). Таким образом, изменение ПЭ определялось разницей между суммой $Adv(\Pi)$, $Diss_{ver}(E)$ и работой силы плавучести.



Р и с. 3. Изменение со временем осредненных по объему слагаемых в уравнении (7) – *a*, *b*: кривая 1 – BFW , 2 – $\tau \rightarrow E$, 3 – $Diss_{ver}(E)$, 4 – $Diss_{hor}(E)$, 5 – $\partial E / \partial t$ и в уравнении (14) – *c*: кривая 1 – $(-BFW)$, 2 – $Diff_{ver}(E)$, 3 – $Adv(\Pi)$, 4 – $Fluxes$, 5 – $\partial \Pi / \partial t$

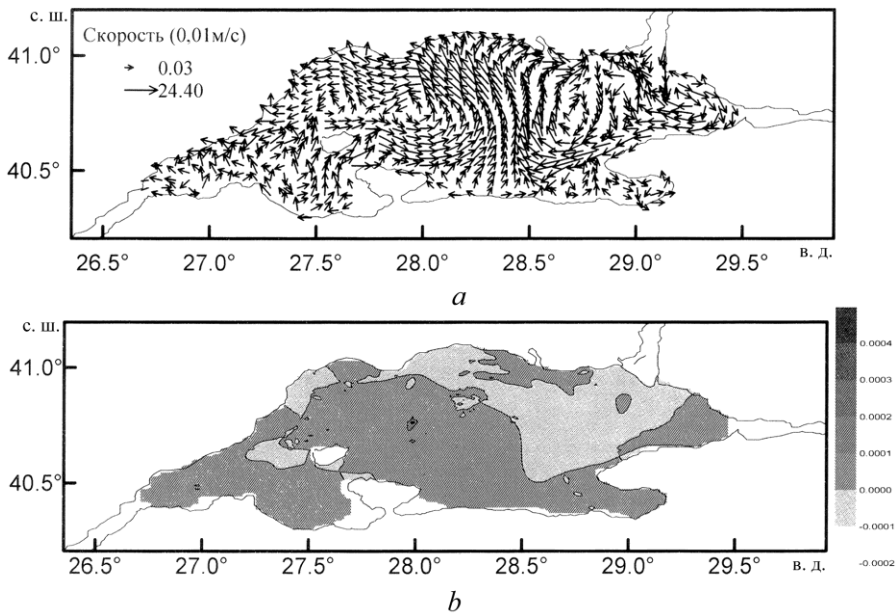
Fig. 3. Change in time of the volume-averaged summands in equation (7) – *a*, *b*: curve 1 – BFW , 2 – $\tau \rightarrow E$, 3 – $Diss_{ver}(E)$, 4 – $Diss_{hor}(E)$, 5 – $\partial E / \partial t$ and in equation (14) – *c*: curve 1 – $(-BFW)$, 2 – $Diff_{ver}(E)$, 3 – $Adv(\Pi)$, 4 – $Fluxes$, 5 – $\partial \Pi / \partial t$

Проведенный анализ показывает, что если в среднем вклады одних сил (как, например, силы плавучести – в баланс изменения кинетической энергии, силы адвекции – в изменение потенциальной энергии) могут быть велики, то локально особенности циркуляции могут определяться другими факторами. В качестве примера рассмотрим формирование вихрей в прибрежных и глубоководных районах моря, а также в прибосфорской области. Следуя работам [14, 15], определим, какие вихри считаются мезомасштабными и субмезомасштабными. К мезомасштабным квазигеострофическим принято относить вихри, радиусы которых больше бароклинного радиуса деформации Россби (R_d), и число Россби (R_0) для них значительно меньше единицы. Субмезомасштабными агеострофическими являются вихри, радиус которых меньше радиуса R_d , а R_0 – порядка единицы. Как известно,

$$R_d = \frac{\sqrt{gH(\Delta\rho/\rho)}}{f}, \quad (15)$$

$$R_0 = \frac{U}{Rf}, \quad (16)$$

где g – ускорение свободного падения; H – глубина; f – параметр Кориолиса; U – орбитальная скорость вихря; R – радиус вихря. Для Мраморного моря при $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, $H = 25 \text{ м}$, $\Delta\rho/\rho = 10^{-2}$, $f = 9,53 \cdot 10^{-5} \text{ 1/с}$ получим $R_d = 17 \text{ км}$.



Р и с. 4. Поле скорости – a и приток энергии от ветра $\tau \rightarrow E$ (10^{-7} Вт, изолинии) – b на горизонте 2,5 м 20.03.2008 г.

Fig. 4. Velocity field – a and energy inflow from wind $\tau \rightarrow E$ (10^{-7} W, isolines) – b on horizon 2.5 m on 20.03.2008

Проанализируем механизм образования циклонического вихря в западной части моря (рис. 4). В период 16–20 марта над регионом преобладал устойчивый юго-западный ветер. Область положительных величин $\tau \rightarrow E$

в центральной части моря соответствует обширному циклоническому образованию диаметром до 40 км и орбитальной скоростью до 0,12 м/с. Согласно (16), $R_0 = 0,06$. Таким образом, этот вихрь с радиусом больше R_d и с $R_0 \ll 1$ является мезомасштабным. Глубина его проникновения 20 м, время жизни – 8 сут. При формировании такого мощного циклонического вихря квазистационарный центральный антициклон, описанный в работах [1–3], сместился в восточную часть моря (рис. 4, а).

Влияние работы силы плавучести на формирование и развитие мезомасштабных вихрей демонстрирует следующий пример (рис. 5). В восточной части бассейна (рис. 5, а) сформировался циклон ($28,75^\circ$ в. д., $40,63^\circ$ с. ш.) с диаметром около 50 км, орбитальной скоростью до 0,24 м/с и глубиной проникновения 30 м. Время его жизни составило 25 сут. Вычисленное по формуле (16) для этого циклона число Россби при $U = 0,24$ м/с, $L = 25$ км, $f = 9,53 \cdot 10^{-5}$ 1/с будет равно 0,1. Следовательно, этот циклонический вихрь можно отнести к мезомасштабным. Расположение зоны мезомасштабного вихря совпадает с областью повышенных положительных значений работы силы плавучести, и, следовательно, формирование такой структуры произошло в результате перехода энергии из доступной потенциальной в кинетическую. Более тяжелые средиземноморские воды, перемещаясь в центральную область Мраморного моря в результате втока через пролив Дарданеллы, обуславливают в поле плотности увеличение поперечных градиентов и, как следствие, возрастание орбитальных скоростей. И, таким образом, можно предположить, что бароклинная неустойчивость крупномасштабного течения служит причиной образования этого циклонического вихря.

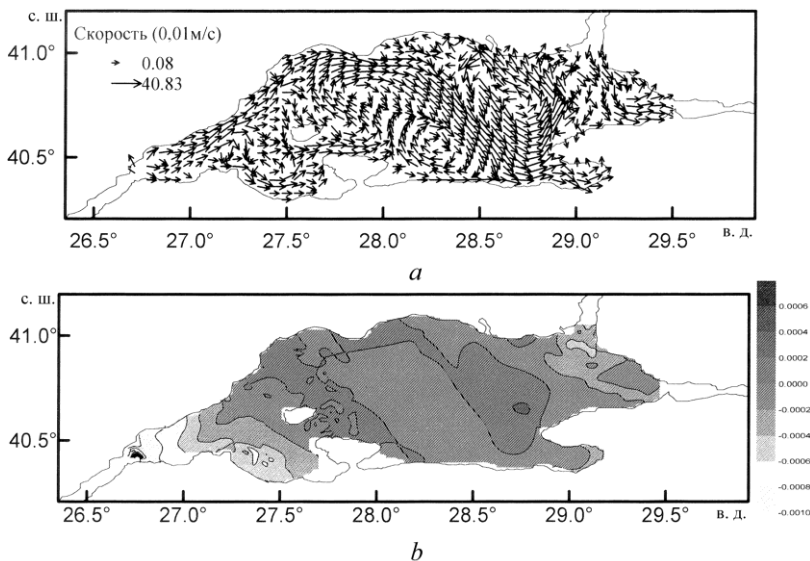
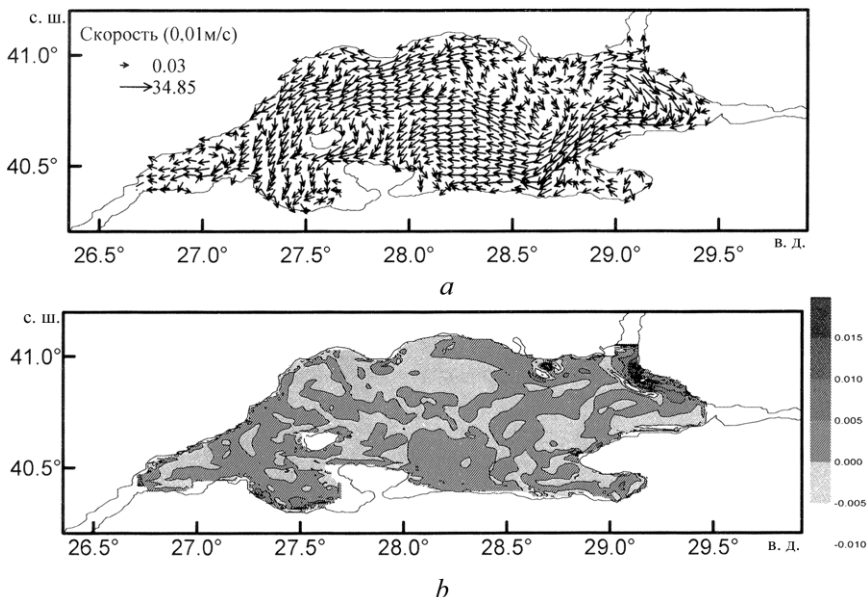


Рис. 5. Поле скорости – а и BFW (10^{-7} Вт, изолинии) – б на горизонте 2,5 м 20.11.2008 г.
Fig. 5. Velocity field – а and BFW (10^{-7} W, isolines) – б on horizon 2.5 m on 20.11.2008

В Мраморном море бароклинная неустойчивость является также одним из возможных механизмов образования прибрежных субмезомасштабных вихрей (рис. 6). Видно, что у северо-восточной части побережья ($28,65^\circ$ в. д., $40,89^\circ$ с. ш.) расположился циклон с диаметром около 7 км, орбитальной скоростью

ростью до 0,25 м/с и глубиной залегания до 40 м (рис. 6, *a*). Анализ структуры поля скорости по всей глубине в этом районе показал, что нет свидетельств о сдвиговой неустойчивости. В то же время на соответствующей карте распределения работы силы плавучести (рис. 6, *b*) в месте расположения этого вихря зоны максимальных положительных значений *BFW* чередуются с зонами больших отрицательных значений *BFW*. Так как знак работы силы плавучести определяется знаком вертикальной скорости, то отображенное на рис. 6, *b* пространственное распределение этих зон свидетельствует о существовании в поле плотности этого района моря больших горизонтальных градиентов. Наличие такого условия является признаком формирования бароклинной неустойчивости, в результате которой происходит переход из доступной потенциальной энергии в кинетическую. При значениях $U = 0,25$ м/с, $L = 3,5$ км, $f = 9,53 \cdot 10^{-5}$ 1/с для представленного вихря имеем вычисленное по (16) $R_0 = 0,75$. Параметры конкретного приведенного на рис. 6, *a* вихря ($R_0 = 0,75 \approx 1$ и $L = 3,5$ км $< R_d = 17$ км) удовлетворяют критерию субмезомасштабности вихрей, а пространственное распределение зон работы силы плавучести в месте его расположения свидетельствует о бароклинной неустойчивости вод в этом районе. Видно также, что в это же время в восточной части прибосфорской области бассейна образовался антициклон с диаметром 25 км, орбитальной скоростью до 0,20 м/с, глубиной проникновения до 30 м и временем жизни 7 сут (рис. 6, *a*). На карте распределения работы силы плавучести (рис. 6, *b*) в указанном районе наблюдаются экстремальные значения *BFW*, что обусловлено втоком более пресных черноморских вод. Поэтому формирование данного вихря связано с процессом перехода энергии из доступной потенциальной в кинетическую.



Р и с. 6. Поле скорости – *a* и работа силы плавучести (10^{-7} Вт, изолинии) – *b* на горизонте 10 м 05.03.2008 г.

F i g. 6. Velocity field – *a* and buoyancy force impact (10^{-7} W, isolines) – *b* on horizon 10 m on 05.03.2008

Так как размер расчетной сетки составляет 178 точек по оси абсцисс и 104 – по оси ординат и средства графической визуализации не позволяют отразить действительные возможности численной сетки, вышеприведенные на рис. 4–6 векторные поля имеют иллюстративный характер.

Заключение

На основе термогидродинамической модели МГИ с учетом реального атмосферного воздействия 2008 г. проведен численный эксперимент по воспроизведению динамических и энергетических характеристик Мраморного моря. Рассчитаны среднегодовой и среднесезонные балансы КЭ и ПЭ.

В среднем за 2008 г. происходит увеличение полной энергии. Изменение среднегодовой КЭ в основном обусловлено работой силы плавучести и притоком энергии от ветра, вклад которых компенсировался диссипацией энергии по горизонтали и вертикали. На изменение ПЭ основное влияние оказывали работа силы плавучести, адвекция ПЭ и вертикальная диффузия. Увеличение ПЭ в рассматриваемой системе в среднем за год происходило преимущественно за счет горизонтального переноса, вызванного влиянием пролива Босфор.

Изменение среднесезонной КЭ обусловлено работой силы плавучести, диссипацией энергии по горизонтали, притоком энергии от ветра и турбулентным перемешиванием по вертикали. Анализ средних по объему слагаемых в уравнениях скорости изменения КЭ показал, что вклад от работы силы плавучести компенсируется преимущественно трением по горизонтали, приток энергии от ветра – трением по вертикали. Для скорости изменения ПЭ основной баланс соблюдается между турбулентным перемешиванием по вертикали, работой силы плавучести и адвекцией ПЭ.

Анализ карт пространственных распределений трехмерных полей гидродинамических и энергетических характеристик циркуляции вод Мраморного моря на каждые сутки времени интегрирования позволил заключить, что в верхнем слое моря мезомасштабные вихри могут формироваться как за счет воздействия ветра, так и вследствие бароклинной неустойчивости течений. На генерацию субмезомасштабных круговоротов в прибрежных районах преобладающее влияние оказывают процессы бароклинной неустойчивости. В прибосфорском районе в результате втока менее плотных вод наблюдается усиление горизонтальных градиентов в поле плотности и, как следствие, развитие процессов вихреобразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The circulation and hydrography of the Marmara Sea / T. S. 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. 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

4. 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>
5. Circulation of the Turkish Straits System under interannual atmospheric forcing / A. Aydođdu [et al.] // *Ocean Science*. 2018. Vol. 14, iss. 5. P. 9999–1019. <https://doi.org/10.5194/os-2018-7>
6. *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>
7. *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.
8. *Demyshev S. G., Dymova O. A.* Analyzing intra-annual variations in the energy characteristics of circulation in the Black Sea // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. Vol. 52, iss. 4. P. 386–393. <https://doi.org/10.1134/S0001433816040046>
9. Modeling of Hydraulically Controlled Exchange Flow in the Bosphorus Strait / T. Oguz [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 1990. Vol. 20, no. 7. P. 945–965. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1990\)020<0945:МОНСЕР>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1990)020<0945:МОНСЕР>2.0.CO;2)
10. *Запелалов А. С.* Сезонная изменчивость вертикальных распределений температуры и солености в Мраморном море // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 2. С. 78–84.
11. *Beşiktepe T. S.* 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)
12. *Beşiktepe Ş., Özsoy E., Ünlüata Ü.* Filling of the Marmara Sea by the Dardanelles lower layer inflow // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1993. Vol. 40, iss. 9. P. 1815–1838. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(93\)90034-Z](https://doi.org/10.1016/0967-0637(93)90034-Z)
13. *Pacanowski R. C., Philander S. G. H.* Parameterization of Vertical Mixing in Numerical Models of Tropical Oceans // *Journal of Physical Oceanography*. 1981. Vol. 11, no. 11. P. 1443–1451. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1981\)011<1443:POVMIN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1981)011<1443:POVMIN>2.0.CO;2)
14. *Каменкович В. М., Кошляков М. Н., Монин А. С.* Синоптические вихри в океане. Л. : Гидрометеониздат, 1987. 509 с.
15. *Thomas L. N., Tandon A., Mahadevan A.* Submesoscale Processes and Dynamics // *Ocean Modeling in an Eddy Regime* / Eds. M. W. Hecht, H. Hasumi. Washington, DC : American Geophysical Union, 2008. P. 17–38. (Geophysical Monograph Series, vol. 177). doi:10.1029/177GM04

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

Шокуров Михаил Викторович, ведущий научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0003-1595-8281**, shokurov.m@gmail.com